



TITLE:

ミカン園散水カンガイの研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

海田, 能宏

CITATION:

海田, 能宏. ミカン園散水カンガイの研究. 京都大学, 1970, 農学博士

ISSUE DATE:

1970-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r1678>

RIGHT:

ミカン園散水カンガイの研究

1970年5月

海 田 能 宏

ミカン園散水カンガイの研究

目 次

緒 言	1
I 土壌水分の消費機構ならびに消費水量	2
1. ま え が き	2
2. 試験地区，試験ホ場	4
2-1 試験ホ場の位置，試験種目	4
2-2 試験ホ場の土壌	5
3. 試 験 方 法	5
3-1 土壌水分の測定	5
3-2 ガラスフィルターブロック土壌水分計	6
3-3 カンガイ管理，その他	7
3-4 根群分布調査	7
4. 土壌水分の消費機構	7
4-1 土壌水分乾燥過程の一般的な傾向	7
4-2 根 群 分 布	8
4-3 乾燥過程における土壌水分プロフィール	11
4-4 土壌水分の毛管上昇移動量の算定	11
4-5 土壌水分消費の水平部位による差異	14
5. 消 費 水 量	15
5-1 消費水量と土壌水分状態との関係	16
5-2 水平部位による消費水量の差異	
— 代表部位の問題 —	17
5-3 各試験ホ場における平均日消費水量（平均日ET）について	17
6. 総 括	20
II カンガイの効果について	23
1. ま え が き	23

2. 土壌水分と果実肥大について	29
3. 増収効果および品質について	31
3-1 果径階級構成	34
3-2 品質（果実の成分分析結果）	34
3-3 収 量	34
Ⅲ 散水の浸入，浸入後の土壌水分拡散移動について	37
1. ま え が き	37
2. 散水の浸入	38
2-1 散水の浸入プロファイルについて	38
(1) 測定方法	
(2) 結果および考察	
2-2 浸入強度について	40
2-3 地表流去について	40
3. 散水浸入後の土壌水分拡散移動について	42
3-1 樹冠下の散水量分布	42
3-2 散水浸入後の土壌水分拡散移動	43
(1) 測定方法	
(2) 結果および考察	
平地の場合	
傾斜地の場合	
4. 散水配分効率（Spraying Pattern Efficiency, E_p ）	
について	47
5. 総 括	48
Ⅳ 有効降雨についての考察	55
1. ま え が き	55
2. 計 算 方 法	55
2-1 計 算 方 法	55
2-2 条 件	55

3. 月平均有効降雨に関する考察	56
3-1 カンガイのタイミングによる有効降雨量の差異	66
3-2 1回カンガイ水量多寡による有効降雨量の差異	67
4. 総括	67
V 散水カンガイの効率, スプリンクラー散水性能と配列間隔について	71
1. ま え が き	71
2. 試 験 方 法	73
2-1 使用器種および条件	73
3. 散 水 効 率 (E a)	73
3-1 散水効率と気象条件との関係	73
3-2 葉面付着水量について	74
(1) 裸地と樹園地の散水効率 (E a) の比較	
(2) 付着水量の直接測定	
(3) シキワラ付着水量	
4. 散水の風による影響	76
4-1 散布図型に及ぼす影響	76
4-2 配分効率に及ぼす影響	77
5. 適正配列間隔について	78
6. 樹園地散水の特質	82
6-1 4本複合散水の場合の効率について	82
6-2 多数複合散水の場合の効率について	83
7. 総括	84
VI 傾斜地散水の特質	91
1. ま え が き	91
2. 傾斜地散水のある工夫	
— スプリンクラー回転軸を下方斜面側に傾けること —	91
2-1 回転軸を傾斜させた場合の水流飛跡	92
2-2 回転軸傾斜度	92

2-3	回転軸を傾斜させることによって生ずる二, 三の問題	93
3.	単一散水散布図型	94
3-1	無風時単一散布図型	94
3-2	風による影響	94
4.	配列間隔について	94
4-1	傾斜方向の間隔縮少	94
4-2	風の影響の考え方について	95
4-3	配分効率について	96
5.	総括	97
結語		101
謝辞		103
引用文献		104

緒 言

現下，ミカン園の散水カンガイ事業は各地で急速に進展しつつある。しかし，カンガイ事業実施の要望の方が散水カンガイ計画，設計に関する統一的な基準の整備に先行している感がある。多くのカンガイ事業の中にはその調査計画の段階で種々不統一な点も見受けられるようである。このような中であって，従来の畑地カンガイ計画基準を一新すべく農林省を中心として各地で計画基準作成調査が行なわれ，現在それらのとりまとめの段階にある。

畑地カンガイ計画の体系化のためには，計画に必要なすべての要素を網羅しそれらを論理的に関連づけ，しかも同一精度であつかうということが必要であろう。

本研究は，このような観点から，ミカン園散水カンガイに関する諸課題，すなわち，散水の浸入，浸入後の土壌水分の拡散現象，土壌水分の保留と消費機構，消費水量，さらに散水器の配列間隔，散水カンガイの効率に關与する諸因子の解明などについてホ場における一連の試験研究を行ってきたことをとりまとめたものである。散水カンガイに関する諸事項を網羅し，一連の相互関係の中においてしらべてみると，それぞれ密接な関連をもち，結局は用水量問題の解明ということにつながっていくことがわかる。というのは，土壌水分消費の機構を解明することは消費水量，1回カンガイ水量と有効雨量で代表される用水量の問題に，また諸々の条件下での散水器の適正な配列間隔，散水分布とか散水後の土壌水分拡散現象の解明はカンガイ効率向上の方策ということに結びつき，結局は合理的な用水量決定ということに帰結するからである。従って，本論文で述べる種々の項目を畑地用水量決定の合理化という観点で整理してゆくと，こみいった諸要素や調査項目などがかなりすっきりとまとまってくるように思われる。

今後ますます進展してゆくであろう畑地カンガイ事業の計画を合理的なものにしてゆくために，調査方法と項目を統一してカンガイの基礎調査を数多く実施してデータを集積し，わが国独自の畑地カンガイ技術体系を確立してゆく必要があるが，本研究が今後のより進んだ調査研究の一助ともなれば幸いである。

I 土壤水分の消費機構ならびに消費水量

1 ま え が き

畑地のカンガイ計画において、カンガイ対象作物の生育場における土壤水分の消費機構を解明することはカンガイの方法、カンガイ開始時期、カンガイ水量などを決定するための基礎を与え、また消費水量はカンガイ計画の最も基本的要素である。

消費水量を求める方法としては大別して

水収支法 — ラインメータ法と土壌水分変化追跡法

微気象要素との相関法 — 微気象学的手法を用いる熱収支法、乱流拡散法、傾度法

マクロな気象要素との相関法 — ソーンズウェイトやブラニイ・クリドルの経験公式が考えられる。

ここでわれわれが認識しなければならないことは、カンガイ工学的立場に立って見た場合、単に作物による水消費なり蒸発散の機構を解明するのではなく、作物による水消費を作物の生育する場の環境、すなわち土壌、土壌水分、地上環境などとの関連性においてとらえなければならないことである。カンガイは土壌を媒体として作物の正常な生育に必要な水を供給することであり、水消費の機構はとくに土壌の水分状態との関連性においてとらえなければならない。この点カンガイ工学上の水消費機構の究明と作物水分生理の研究との大きな差異がある。

土壤水分の消費機構についての研究には従来より三つの異なった方向があるようである。一つは不飽和浸透理論的アプローチによって土壤水分の乾燥過程、水の浸入再分布などの諸現象を解明しようというもので、Richards¹⁾以後この問題の土壤物理学分野での進展は目覚ましいものがあり、とくに米国では現在浸透理論研究の主流をなしていると思われる。

本文ではこれらについて研究の系譜を述べることは目的外のこととなるので省略し、畑地カンガイ分野と直接関与する研究成果を二、三あてがってみることにする。

不飽和浸透理論の応用分野でかなり成功していると考えられるのは土壌面からの蒸発にともなう土壌水分変動と水の浸入問題とである。前者については拡散型方程式の拡散係数

D一定という仮定は土壌水分が減少してくると成立しがたいので、非線型方程式となるが、最近の電子計算機による数値解法の進歩により比較的単純な境界条件に対しては容易に解が得られ、実測値との近似的な一致が報告されている。^{2,3,4)}しかし、植物根群の吸水による土壌水分変動が生ずる場でのこのような理論的な取扱いは困難で Philip⁵⁾ による円筒関数化による一本の根の周囲の水の移動の理論的解析、Gardner⁶⁾ の吸水機構に関する理論的研究、および単純な根毛モデルによる実験的研究⁷⁾ があるが、未だ試論の域を出ず、作物生育場における土壌水分変動を理論的に説明する方途はないと言えるようである。後者の浸入問題、水の再分布についてはⅢ章で述べることにする。

第2はホ場またはライシメータやポットで作物生育場における土壌水分変動を追跡し、全く実証的に土壌水分変動現象を解明しようというゆき方である。わが国ではこの分野でライシメータ、大型ポットを使用した寺沢⁸⁾、吉良、椎名、竹中、豊田ら及び椎名^{9,10,11,12)}の研究があり、いずれも乾燥に伴う下層から上層への水分移動現象を中心に定性的ないし半定量的な解析を行なっている。その他農林省農業試験場、農林省技術課の計画基準調査¹³⁾をはじめ各事業地区の調査段階で数多くのホ場における実験データが集積されているが、これらは多く計画数値として必要な消費水量と土壌水分消費図型を求めることを主にしたものであり、土壌水分変動の問題に厳密な考察を欠いているうらみがある。したがって、畑地カンガイにおける土壌中の水循環についてホ場において統合的に詳細に土壌水分変動を追跡した実験研究はわが国では少ない。

第3は土壌水分変動を重視するよりもむしろ土壌水分を一定に保つか、またはある範囲に保持して作物生育との関係を主たる視点として研究する方法である。畑地カンガイに直接関与し、用水量の合理的決定法を論じた富士岡、西出¹⁴⁾の研究や玉井¹⁵⁾の実験的研究がある。その他、第3の方法に関するものとして、作物学分野で蒸発散、作物生長を論じたものは数多くみられる。

本章では和歌山県紀の川中流域の数カ所のミカン園において夏期間のカンガイサイクルにおける土壌水分の変動を詳細に追跡して得た結果にもとづき、土壌水分乾燥過程においてあらわれる種々の特徴的な現象およびミカン園における消費水量について考察する。

2 試験地域，試験ホ場

2-1 試験ホ場の位置・試験種目

試験を行なった場所は和歌山県紀の川中流左，右岸の平地および傾斜地の温州ミカン園であって，それらの場所はFig.I-1に示したとおりである。また同一のホ場で後述するⅢ，Ⅴ，Ⅶ章に関する実験を行なったので，それらの試験種目をもFig.I-1に記した。紀の川中流域右岸は河岸段丘上の水田地域を経て和泉かつらぎ山系へとつづき，第三紀層よりなる山地斜面と台地上は一帯に温州ミカンの産地である。左岸は川岸からすぐに急しゅんな古生層山地となり，この古生層は変成作用を受けて片麻岩となっていて¹⁶⁾，未風化の角レキに富み，耕土は浅い。この北斜面も温州ミカンの一大産地である。

試験ホ場としては，地形，土壌条件のなるべく異なる地点を選定し，土壌水分消費機構がそれらの環境・立地条件といかに対応しているかを知ることをも本研究の一つの眼目とした。試験ホ場の地形，土壌，ミカン品種，樹齢，栽培条件，管理などを一覧表にしたのがTable I-1である。

Table I-1 調査ホ場の概況

	地 形	試験樹位置	土 壌	ミカン品種	樹 齢	栽培条件・管理
粉 河	和泉かつらぎ山系 洪積台地 平地	20aの園の中央 コウヤマキ防風垣から15m	表土:SL~L 心土:CL	普通温州 向山系および上林系 (キコク台)	10年生 および11年生 平均樹冠半径 150cm	清耕 約70本/10a カンガイ(ホースおよびスプリンクラー)施設あり (注)和歌山県果樹園芸試験場紀北分場
荒 見	古生層 東面傾斜地 15°(階段畑)	一帯にミカン園	表土:CL 心土:CL	普通温州 (キコク台)	13年生 180cm	清耕 一部シキワラ 60本/10a カンガイ施設 (ホースカンガイ施設)あり
から つぎ	和泉かつらぎ山系 洪積台地 南面傾斜地 25°(山ナリ畑)	東南それぞれ10m コウヤマキ防風垣 三角形園の中央	表土:L~CL 心土:CL	温州 宮川早生 (キコク台)	10年生 130cm	清耕 一部シキワラ 70本/10a (注)和歌山県農業センター隣接の個人所有園
遠 方	古生層(変成片麻岩) 北面傾斜地 20°(山ナリ畑)	コウヤマキ防風垣から15m 一帯にミカン園	表土:CL 心土:レキに富む CL	普通温州 (キコク台)	7年生 150cm	清耕 約80本/10a カンガイ施設 (スプリンクラー)あり

2-2 試験ホ場の土壌

試験ホ場の土壌の物理的性質をまとめてTable I-2に示した。これによると、耕土の土性にはホ場ごとの差異は小さいが、耕土と下層土の配列状態に明確な差がある。すなわち、荒見、かつらぎ地区は耕土が比較的深く、耕土と下層土の土性に不連続的変化が乏しいL-L型 (loam-loam)、粉河地区は耕土が浅くて粘質土壌の下層土からなるL-C型 (loam-clayey loam)、遠方地区は耕土が浅く、角レキに富む下層土 (未風化の角レキの間ダキに clayey な土壌が充てんされている状態) に連続するL-G型 (loam-gravel) と分類できる。

各試験ホ場の土壌のpF～含水比曲線をFig.I-2に挙げた。

Table I-2 土壌の物理的性質

地区名	深さ (cm)	土性*	レキ	腐植	仮比重	ホ場 容水量 (pF1.8)	水分当量 (pF3.0)	初期 シオレ点 (pF3.8)
粉 河	0~15	L	含む	含む	1.22	26	17	9
	15~30	CL	含む	なし	1.24	24	17	9
	30~45	CL	なし	なし	1.26	23	18	10
	45~60	CL	なし	なし	1.29	24	18	10
荒 見	0~15	SL	含む	含む	1.34	23	14	8
	15~30	SL	含む	なし	1.26	24	14	8
	30~45	SCL	富む	なし	1.34	24	14	8
	45~60	SCL	富む	なし	1.32	24	14	8
かつらぎ	0~15	SL	含む	含む	1.18	24	14	8
	15~30	SL	含む	なし	1.31	21	13	7
	30~45	CL	なし	なし	1.33	21	14	8
	45~60	CL	なし	なし	1.38	22	17	9
遠 方	0~20	CL	含む	含む	1.25	25	18	—
	20~40	CL	富む	なし	—	—	—	—

* 国際土壌学会の分類による。

3 試 験 方 法

3-1 土壌水分の測定

1本のミカン樹の支配する域内の土壌水分の変動を追跡するためにFig.I-3に示した

ような樹間部と樹冠下部を含む部位で、それぞれ深さ5, 15, 25, 35, 45, (55) cm にガラスフィルターブロック土壌水分計¹⁷⁾ (以下ガラスブロックという) を埋設しておき、カンガイ期間を通じて土壌水分計測を行なった。測定時刻は原則として午前9時と午後6時の2回とし、一部のガラスブロックについては電子管式自動平衡記録計によって自記記録させた。ガラスブロックの電気抵抗値と土壌水分のキャリブレーションについては、埋設の前後の埋設部分の土壌を実験室に持ちかえり、金網バスケットの内で関係カーブを作成した。

また、それぞれの試験ホ場で同一の樹または近接の樹につきテンションメータを樹間部と樹冠下部にそれぞれ7.5, 20, 30, 40 cm 深さに埋設して、午前9時に土壌水分張力を測定した。含水比～張力の関係カーブについては、現場定容採土試料を吸引法によって脱水した場合、現場採土によってテンションメータ指度と関係づけた場合、大量に採土しテンションメータを直接埋設して関係カーブを作成した場合と3様の求め方をした。

土壌水分計測に付随する測定項目としては、地温 (ガラスブロックの温度補正をするため)、計器蒸発量 (ホ場内あるいはなるべく近接した露場)、雨量 (同左)、土壌面蒸発量、根群分布量などである。

3-2 ガラスフィルターブロック土壌水分計¹⁹⁾

(ガラスブロック)

ガラスブロックは2電極電気抵抗式土壌水分計である。ニッケルの棒状電極をつつむ吸収体には、適当な粒度分布のガラス粉末を整形して600～700℃で焼成してporous filter としたものをを用いている。構造図を Fig. I-4 に示した。このブロックの特徴は比較的安定性の良いことと、可測水分範囲が湿 F.C. ～pF 3.8 ぐらいまでとかなり広く、吸水ならびに脱水過程の time lag が小さいことである。また、欠点としては、他の電気抵抗式水分計と共通したことであるが、土壌塩類濃度と土壌温度の影響を強く受けることである。したがって、筆者は各温度で電気抵抗値と含水比とのキャリブレーション・カーブを作成して、温度補正を行なった。キャリブレーション・カーブとその温度特性に関するデータの一例を Fig. I-5 に挙げた。また、土壌塩類濃度の影響を避けるために試験期間中の施肥は一切行わず、試験開始前と終了後に採土して、キャリブレーション・カーブの作成を2回行なった。

3-3 カンガイ管理, その他

土壌水分の管理については自然降雨をシャ断せず自然の状態に放置しておき, カンガイ対象土層の平均土壌水分が \geq C.M.E. (pF 3.0) に達したときをカンガイ開始時期と判定して, スプリンクラーまたはホースにより 30~35 cm 深さまでの土層の土壌水分が F.C. (ホ場含水量, pF 1.5~1.8) に達するに必要な水量を供給した。^{14, 18)}

3-4 根群分布調査

土壌水分消費機構をくわしく検討するためには供試樹の根群分布を知る必要がある。そこで, すべての供試樹について, Fig. 1-3 中に描いた範囲を原則として, 樹幹を中心とする十文字の方向に隣接する樹との中間点まで順に 50×50×10 cm の土壌ブロックを掘りとり, その中に含まれる根群全量を手で選別した。対象土層深さは径 2 mm 以下の細根の存在する深さまでとした。

次に各ブロックに含まれる細根について根表面積を算出した。ただし, 採取された根群から直接に根表面積を計量することはできないので, 一たん根重表示とし, 各段階の根径 (2.0~1.0, 1.0~0.4, 0.4 mm 以下) に分類したものよりランダムサンプリングして根重~根表面積の関係を求め, それにより根表面積に換算した。径 2 mm 以上の根は吸水機能を持たず, 一応吸水に関与するのは 2 mm 以下の細根であると考え, また吸水機能の面からは, 従来のように根重表示するよりも根表面積表示とした方が直接的な指標になると考えたからである。

4 土壌水分の消費機構

本研究の期間は昭和 38 年から 41 年の 4 年の夏期間にわたり, 試験ホ場も 4 カ所 (6 地点) 設けたので, データはかなりの量にのぼっている。したがって, 本論文では代表的なデータを挙げて考察し, できうるかぎり一般的な形にまとめようとしたものである。

4-1 土壌水分乾燥過程の一般的な傾向

数多く得られたデータのうち連続干天時のものを選びだし, 各測点, 各深さの土壌水分の経日変化を描くと Fig. 1-6 のようになる。また, 昭和 41 年かつらぎ試験ホ場にお

ける測定結果について、全測定期間にわたるガラスブロック電気抵抗値変動、土壌水分変動および降雨量、散水量、計器蒸発量の値などをFigs. I-7および8に示した。

これらによると、土壌水分乾燥の状態は深さによりきわめて明確に異なった傾向を示すことがわかる。すなわち、便宜上測定対象土層を10 cmごとの4層に分割して層ごとの傾向をみると、第1層（0～10 cm）ではカンガイ後初期の乾燥速度が大きく、一般に5～6日経過するとすでにC.M.E.に達し、とくに表層5 cmまでの乾燥は著しく、シオレ点（W.P.）に達することがあるようである。1, 2, 3層と進むにつれて下に凸な乾燥曲線から漸次S字型曲線に移行してゆくことがわかる。第3層（20～30 cm）にみられる特徴は、乾燥過程初期の水分変化は微少であるが、カンガイ後5日目ぐらい — すなわち第2層までの有効水分の多くが失われ水分コウ配が大きくなった時点 — から根群分布量に比較してかなり急激に乾燥を開始して、7～9日を経過すると第2層（10～20 cm）に近い水分値（C.M.E.よりやや湿潤）に達するような乾燥曲線を描くことである。第4層（30～40 cm）の水分変化は小さく、やや第3層に類似した傾向を示すにすぎない。

詳細については後述するが、他の土壌、土層配列、地形条件下の試験ホ場におけるデータも傾向としては上述のものと一致した乾燥曲線を示している。

4-2 根 群 分 布

調査結果をTable I-3に挙げた。根群分布は水平部位（50 cm間隔）、垂直部位（10 cm間隔）別に表示し、数値は土壌ブロック1ℓ当りの根群表面積 cm^2 数で示している。

例えば粉河地区の供試樹の場合、20 cmまでの土層に全体の約90%にも及ぶ量が存在し、20～30 cm層に約10%、30 cm以下は clayey な下層土となっており吸水根は全く存在しない。供試樹は栽植時に樹幹の近傍にあたる部分のみしか深耕を施されていないのであるが、同一圃の深耕区の他の樹についても検土ステッキにより簡単に分布深さを調べたところ、同様に30 cm程度であった。このように本供試樹の主根群分布域はわずかに20 cmであった。水平的な分布状態を検討してみると、樹冠縁下を境にしてその内側に54%、外側に46%が分布し、樹幹付近（とくに北側）ではとくに僅少であった。このように水平的分布の変化はかなり大きいのであるが、樹枝の発展方向ならびに樹枝密度と根群分布量との間には一般に言われている程には明確な相関がみられなかった。

Table 1-3 根群分布調査結果
(根群表面積 $\text{cm}^2/1\ell$ soil block)

かつらぎ	W	← 50cm				樹幹	→ E					
10cm	45.0%	↓	74.4	79.8	86.3	54.4	↓	20.8	28.0	54.7	56.8	42.4%
	25.3	↑	32.7	40.2	47.3	15.5		9.77	19.7	54.2	31.6	30.5
	17.6		32.0	38.9	22.4	1.07		6.35	21.4	39.6	19.3	22.9
	12.1		2.46	5.71	2.54	0.76		2.61	2.01	4.12	6.74	4.2
			26.4	30.6	39.6	13.4%		10.5	18.8	40.4	30.3%	

N							S			
36.5%		44.4	69.5	47.8		43.0	57.7	14.4		72.6%
28.4		43.7	65.8	16.2		9.99	25.2	29.6		19.2
25.6		54.3	50.0	9.08		6.06	10.6	11.1		8.2
9.5		83.4	26.6	7.30						
		34.0	47.8	18.2%		17.5	27.8	54.7%		

粉河 (1)

深さ	N						S				
0cm	62.4%	40.3	49.6	10.3	34.4		13.4	23.2	35.1	16.8	40.2%
10	29.0	44.8	10.7	1.2	5.9		18.4	20.8	26.6	28.8	43.0
20	8.6	9.1	5.5	0	4.0		15.7	13.3	4.8	3.2	16.8
30	平均18.0	43.6	30.5	5.4	20.5%		21.6	26.0	30.2	22.2%	平均18.3cm ² /1000cc
		200	150	100	50cm		50	100	150	200cm	

深さ	W						E			
0cm	55.6%	24.2	63.8	49.2	32.3		7.1	51.5	93.6	38.2%
10	39.0	36.4	31.6	40.3	10.4		4.8	44.2	15.7	51.7
20	5.4	9.8	1.9	3.9	1.0		0	7.6	32.8	10.1
30	平均25.4	23.1	31.9	30.7	14.3%		3.0	25.9	71.1%	平均44.3cm ² /1000cc

粉河 (2)

深さ	W						E				
0cm	51.5%	20.7	28.0	28.6	21.3		42.9	31.0	27.6	40.5	68.5%
10	41.3	16.4	23.4	13.4	16.0		10.3	5.1	11.9	29.6	27.4
20	7.2	6.5	0	5.1	2.2		1.8	0	1.1	5.5	4.1
30	平均15.9	22.8	26.8	29.8	20.6%		26.6	17.4	19.6	36.5%	平均17.3cm ² /1000cc
		200	150	100	50cm		50	100	150	200cm	

深さ	N						S			
0cm	50.4%	43.9	11.8	7.4	5.3		32.9	42.2	71.2	62.0%
10	43.6	32.2	7.0	16.9	3.2		20.6	19.4	25.5	27.7
20	6.0	5.1	0.6	0.4	2.1		7.7	3.7	12.8	10.3
30	平均11.3	59.7	14	18.1	7.9%		25.9	27.7	46.4%	平均26.2cm ² /1000cc

Table I-3 のつづき

遠 方		W				E				
0 cm	70.9%	38.5	44.5	32.1	37.4	54.2	55.8	47.2	332	615%
10	22.1	5.99	5.13	9.31	27.1	40.5	31.8	14.2	286	28.9
20	4.2	2.18	0.70	2.51	3.72	7.33	10.7	2.46	2.45	7.4
30	2.8	3.24		1.66	1.08	3.16	3.21	0.36		2.2
40		23.2	23.4	21.2	32.2%	34.0	32.8	20.7	12.4%	

各試験ホ場における根群分布を整理すると、Table I-4 のとおりとなり、いずれもきわめて類似した垂直分布を示しているが、分布域の深さはかつらぎ（L-L型）でもっとも大きく、ついで粉河（L-C型）と遠方（L-G型）は同等の値を示した。L-G型の場合、下層土への根群の伸長は角レキと角レキの間を充てんしている clayey な土壌の中へ不均一的に貫入している状態であった。

Table I-4 根群分布（整理結果）

(1) 垂直分布 vertical

深 さ	粉 河 (1)	粉 河 (2)	かつらぎ	遠 方
0～10 cm	47.8%	59.8%	49.1%	65.4%
10～20	42.3	33.0	25.9	26.1
20～30	9.9	7.2	18.6	6.1
30～40	0	0	6.1	2.4

(2) 水平分布 horizontal

距 離 *	粉 河 (1)	粉 河 (2)	かつらぎ	遠 方
0～50 cm	14.9%	20.2%	14.9%	17.6%
50～100	22.0	23.3	30.0	21.4
100～150	40.9	26.8	39.9	27.4
150～200	22.2	29.7	14.2	33.6

注) * 樹幹からの距離

数値はいずれも4測線における値の平均値

平均根群分布密度の点からみると、土層 40 cm までをとって比較すると、かつらぎ 30.2, 粉河 15.8, 遠方 9.7 $\text{cm}^2/1\ell$ (吸水根の分布する深さまでの土層をとって比較すると、かつらぎ 30.2, 粉河 25.3, 遠方 12.9 $\text{cm}^2/1\ell$) となり、大きな差異があった。

カンキツ類の根の酸素要求量(呼吸量)はウメと並んでとくに大きいといわれ、根群伸長の制限因子として通気性が第一で、ついで機械的因子としての土壌硬度、および土壌水分状態であるとされている。したがって、吸水根分布は 30~40 cm を限度としてとくに表層 20 cm 以内に集中するのである。

なお、根量を比表面積であらわすと、1.0~2.0 mm のものの全体に対する割合は根重表示に比べて小さく、逆に 0.1~0.4 mm の占める割合は大きくなり、実際に近い表示ができるものと思われる。またカンキツ類の根は径 0.1 mm 以下のものはまれであるから根径別分類が容易であり、表面積換算に伴う誤差も小さいと考えられる。

4-3 乾燥過程における土壌水分プロファイル

各土層配列(L-L, L-C, L-G), 各水平部位(樹間部, 樹冠縁下部, 樹下部)における土壌水分ならびに土壌水分張力プロファイルの経日変化(乾燥過程)をプロットしたのが Fig. I-9 である。これによると土壌水分張力コウ配は乾燥が進行するにつれて、表層の水分張力がとくに大きくなるために、全体として経日的に増大してゆく。しかし、20~40 cm 層の水分張力は、表層における張力が pF 2.5~2.6 に達すると、すなわち水分張力コウ配が増大するとそれに引かれるように上昇してゆく(例えば粉河地区<L-C>)。この現象は前述のように 20~40 cm 層の根群分布密度の僅少なことから、水分の毛管上昇移動に基づくものと解釈される。土壌水分プロファイルに注目しても、かつらぎ(L-L), 粉河(L-C)において上述のことを認めることができる。この毛管上昇移動の程度は土壌配列条件の差異によってかなり異なっているようであるから、次項でこれを検討する。

4-4 土壌水分の毛管上昇移動量の算定

まずこのことを検討する前に、ある点の根群分布量と同一点の土壌水分乾燥の極限との関係をみてみる。極限とはこの場合、カンガイ直前の土壌水分値をいうものとする。結果は Fig. I-10(1)のようになり、~~一次~~関係にあるとみなすことができる。

直線

次に同じくある点の根群分布量と同一地点の乾燥速度との関係を見ると Fig. I-10(2) のようである。乾燥速度とは、乾燥曲線を次式で近似したときの定数 b であらわすこととする。2 者の関係はほぼ一次直線とみることができる。

$$\theta_w = a \cdot T^{-b}$$

θ_w : 土壌含水比 (%)
 T : 経過時間 (hr)
 a, b : 定数

Fig. I-10(1), 10(2) は土壌面蒸発の影響が小さいと考えられる深さ 15 cm 層について得られたデータである。したがって、吸水量と吸水速度は根群分布量と一次関係にあるとみなすことができる。したがって、根の吸水機能は、表面積表示をする限りは、深さによる差異がないものとし、かつ吸水量は根量に比例し、かつ土壌面蒸発量を無視し得ると仮定するならば、根群分布割合と土壌水分消費のプロフィールとの対比から、根群域下層から表層への水分上昇移動量の概略値を求めてもそう大きい誤差は生じないであろうと思われる。各土層配列条例別に樹冠縁下部におけるこの値を整理すると Table I-5 のとおりとなる。すなわち、L-C 型 > L-L 型 > L-G 型の順でそれぞれ全消費土壌水分量の 15~23%, 10~15%, 7~9% は直接元の深さから吸水されるのではなく、毛管上昇移動して根群分布量の多い表層に入って後消費されてゆくものと推定される。

Table I-5 土壌水分消費割合と根群分布割合との対比

	かつらぎ	粉 河		遠 方
土壌断面	L-L	L-C		L-G
深さ	S.M.E.P. R	S.M.E.P. R	S.M.E.P. R	S.M.E.P. R
0~10 ^{cm}	37% 51%	40% 48%	41% 60%	62% 65%
10~20	30 26	35 42	29 33	21 26
20~30	26 19	25 10	19 7	9 6
30~40	7 4	— 0	11 0	8 2

注) S.M.E.P., 土壌水分消費割合 (樹冠縁下部における値)
 R 根群分布割合 (同上測点における値)

Table 1-5 (2) 各測点の根群分布型と土壤水分消費割合との対比
(かつらぎ試験ホ場の例)

測点	深さ	16 July~24 July			28 July~3 Aug.			6 Aug~11 Aug.			27 Aug~4 Sept.		
		ET	SMEP	R	ET	SMEP	R	ET	SMEP	R	ET	SMEP	R
E 150	cm	mm	%	%	mm	%	%	mm	%	%	mm	%	%
	0-10	5.9	24.2	35.8	15.0	47.0	35.8	13.6	38.8	35.8	15.3	47.2	35.8
	10-20	6.2	25.6	35.5	8.5	26.5	35.5	7.0	20.0	35.5	7.8	21.6	35.5
	20-30	7.5	30.9	26.0	5.5	17.2	26.0	6.6	18.8	26.0	7.1	19.6	26.0
	30-40	3.0	12.3	2.7	1.8	5.6	2.7	3.2	9.0	2.7	3.3	9.2	2.7
	40-50	1.7	7.0		1.2	3.7		4.7	13.4		2.7	7.5	
		16.6 %			6.6 %			19.7 %			14.0 %		
W 150	0-10				10.7	37.3	52.5	10.1	32.2	52.5	14.5	48.0	52.5
	10-20				13.1	45.7	23.1	15.1	48.2	23.1	17.3	57.2	23.1
	20-30				2.3	8.1	22.6	1.9	6.0	22.6	4.8	15.8	22.6
	30-40				2.6	8.9	1.7	4.3	13.6	1.7	3.7	12.1	1.7
	40-50												
					7.2 %			11.9 %			10.4 %		
E 100	0-10	10.5	40.1	39.4	11.1	57.7	39.4	10.8	41.8	39.4	10.0	35.7	39.4
	10-20	9.5	36.3	27.7	3.6	18.7	27.7	4.9	18.8	27.7	9.9	35.4	27.7
	20-30	4.4	16.8	30.0	3.5	18.3	30.0	8.6	33.1	30.0	6.1	21.9	30.0
	30-40	1.8	6.8	2.8	1.0	5.3	2.8	1.6	6.3	2.8	1.7	6.1	2.8
	40-50										0.3	2.9	
		4.0 %			2.5 %			3.5 %			4.2 %		
W 100	0-10	10.2	32.3	54.4	11.7	34.2	54.4	12.9	31.7	54.4	11.1	32.2	54.4
	10-20	12.2	38.6	29.8	10.8	31.5	29.8	14.8	36.3	29.8	11.8	34.3	29.8
	20-30	8.5	26.9	14.1	9.3	27.1	14.1	10.4	25.5	14.1	10.1	29.3	14.1
	30-40	0.7	2.2	1.6	2.5	7.2	1.6	2.6	6.5	1.6	1.5	4.2	1.6
		13.4 %			18.6 %			16.3 %			17.8 %		

Table I-5 (2) のつづき

測 点	深 さ	16 July~24 July			28 July~3 Aug.			6 Aug.~11 Aug.			27 Aug.~4 Sept.		
		ET	SMEP	R	ET	SMEP	R	ET	SMEP	R	ET	SMEP	R
E 50	cm	mm	%	%	mm	%	%	mm	%	%	mm	%	%
	0-10	13.2	31.3	52.6	9.0	33.9	52.6				8.0	31.9	52.6
	10-20	9.7	27.4	24.7	9.5	35.9	24.7				8.5	33.7	24.7
	20-30	10.9	30.7	16.1	8.0	30.2	16.1				7.5	29.7	16.1
	30-40	1.6	4.6	6.6			6.6				1.2	4.7	6.6
		12.6 %			7.5 %						11.7 %		
W 50	0-10	4.9	19.5	75.9	13.7	43.8	75.9	17.8	48.8	75.9	12.2	45.5	75.9
	10-20	14.9	59.9	21.6	12.5	40.1	21.6	13.4	36.7	21.6	10.8	40.1	21.6
	20-30	5.1	20.6	1.5	5.0	16.1	1.5	5.3	14.5	1.5	3.9	14.4	1.5
	30-40			1.1			1.1			1.1			1.1
		18.0 %			13.5 %			11.9 %			11.8 %		

- 注) 1. ET : 各測点の土壤水分消費量 (蒸発散量) mm
 SMEP : 土壤水分消費型
 R : 根群の垂直分布割合 (根群分布型)
2. SMEPとRにまたがる最下段の数値は、20又は30 cm以下の土層を水分補給域と考えた場合の水分補給量パーセント
 (直接根群から吸水されたのではない水量のパーセント)

4-5 土壤水分消費の水平部位による差異

例えば牧草のような散作作物の場合には地上部、地下部ともに水平断面では均一な環境下にあるといえるが、とくに果樹の場合には水平部位により通風、日射量、根群分布、および施肥状態に至るまで不均一な環境にある。したがって、実際問題としては、どの水平部位がホ場の土壤水分環境を代表するかを解明することも重要である。

代表的なカンガイサイクルについて乾燥曲線を層別に分け、水平部位による差異をみたのが Fig. I-11であり、同一ホ場における土壤水分消費割合 (S.M.E.P.) を水平部位別に整理したのが Table I-6である。これらのデータおよび Fig. I-6, 9からもわかるように、樹間部では樹下部に比べて土壤水分消費量が2倍程度になるほか、消費割合も樹間部では40:30:30~45:30:25というように表層ほど大きい型 (層位型) となるのに対し、樹下部では例えば35:35:30というように深さ方向に大きな差のない型 (均一型) をとる。

Table I-6 水平部位による土壌水分消費割合の差異(粉河)

測点位置	S.M.E.P.			備 考
	0~10 cm	10~20 cm	20~35 cm	
樹 間	41%	31%	28%	} 直射日光を受けない G ₆
	43	32	25	
樹 冠 縁 下 ~樹 下	28	41	31	枝葉で完全に被覆, 南西側 G ₂
	40	31	29	} 東側樹冠縁下 G ₄
	45	30	25	
	33	36	31	} 根群分布極めて少 G ₅
	37	32	31	
樹 下	35	35	30	樹幹近傍 G ₁

注) 測点部位の符号は Fig. I-3 (2) に対応

このような差異を生む要因として, 地表面での物理現象である土壌面蒸発を考えた。重力水を排除できるように金網底の直径25 cm, 深さ11 cmの容器に土壌を充てんし, それを容器内土壌面とホ場地表面が一致するように, 樹間部および樹下部に埋めこみ, 毎朝9時に容器の重量を測定してその重量減少量から土壌面蒸発量を算出した。その結果から, 土壌面蒸発比 α_E (=土壌面蒸発量/計器蒸発量) を容器内土壌含水比に対して月別(時期別)に関係なくプロットすると Fig. I-12 のような関係を得た。一次関係にあるとみることができ, 樹間部では相関係数 $r=0.96$ と高い値であった。 α_E の樹間部と樹下部における差異は明瞭であり, いま土壌水分 F.C.~C.M.E. の間に対応する α_E の平均値を求めると, 樹間部0.75, 樹下部0.36と約2倍のひらきがあることがわかった。本項については次節でより詳細に検討する。

5 消費水量 (ET)

各試験ホ場における土壌水分乾燥過程の追跡結果から, ある測点の土壌水分減少量の垂直方向の和をその測点の消費水量として, 供試樹1本あたりの消費水量を算定した。1本当りの平均消費水量の求め方は, 4~6点設けた測点について, ある測点の支配域をその

測点が含まれるところの幹を中心とするドーナツ状の面積であると仮定し、それぞれの測点の支配面積による加重平均値を計算したものである。

5-1 消費水量と土壌水分状態との関係

代表的なカンガイサイクルにおける日ET量の積算値を（粉河，39年7～8月）水平部位別にあらわしたのが Fig. I-13 である。

水平部位によりET量が大きく異なることは前節で述べたとおりであるが，Fig. I-13 からわかるように，樹間部（ G_3 ），樹冠縁下部（直射日光を受ける G_4 ，直射日光を受けない G_6 ）および1樹当たり平均のET量は経日減衰してゆくのが認められる。しかし樹下部（ G_2 ， G_5 ，ともに直射日光を受けない）では経日減衰がみられない。 G_3 および G_4 の測点では，ET量は1樹当たり平均ET量よりもかなり大きく，しかもカンガイ後初期には蒸発散比 $\alpha_{ET} > 1$ （ただし，蒸発散比 $\alpha_{ET} = \text{蒸発散量 } ET / \text{計器蒸発量 } E_0$ とあらわす）であるのが漸減して， α_{ET} が間断日数に相当する期間を経るとET積算曲線と E_0 積算曲線がクロスする現象があらわれる（この期間の気象条件はほぼ一定であった）。

同一のデータにより，ET減衰を土壌水分状態と対応させたのが Fig. I-14 であり，主たる根群分布域（0～20 cm）の土壌水分とET量とは明らかな相関が認められる。15 cm層の土壌水分がC.M.E.（pF 3.0）程度に低下すると，平均日ETは2 mm/day 前後にまで低下することがわかった。

次に α_{ET} と土壌水分（10 cm深さの場合，および根群域平均値の場合）との関係をみると Fig. I-15 のとおりである。直射日光を受ける部位ではカンガイ直後（ \div F.C.）の $\alpha_{ET} = 1.6 \sim 1.8$ から，土壌水分がC.M.E.を下まわるときの0.4程度にまで減衰している。これに対して樹下部ではカンガイサイクルを通じて $\alpha_{ET} = 0.4 \sim 0.6$ の値に保たれる。なお，土壌水分表示として10 cm深さの値と根群域平均の値の二通りをとったが，いずれもETとの関係を見る場合に良い指標となるようである。また α_E と土壌水分の関係は一次式で示されることは前述のとおりであり，したがって，ET（ α_{ET} ）の経日減衰は E （ α_E ）の減衰によるところが大きいと推察される。

いずれにしても，ET抑制因子は明らかに土壌水分保留量であり，ET算定に関してこの因子を除外して考えるべきでないことを示している。したがって，畑地カンガイ計画の基本数値としてのET量はホ場における土壌水分追跡法によって求めることが最も合理的のようである。

5-2 水平部位による消費水量の差異 — 代表部位の問題 —

樹間部、樹冠縁下部、樹下部と三つに分けて各部位の消費水量の差をみると、例えば粉河(39)においては Table 1-7 のようになる。これによると、樹間部と樹下部では約2倍の差が生じている。

そこで各試験ホ場のデータを Fig. 1-13 と同様な方法で整理して、1樹当り平均に近いET値を示す水平部位を見出そうとした。その結果、例えば Fig. 1-13 中の G₆ のような測点、すなわち日中直射日光を受けず、樹冠縁下からやや内側に寄った部位がこれに相当することがわかった。一般の畑地カンガイ計画調査においては本実験のよう

Table 1-7 水平部位による消費水量の差異
(粉河)

	樹 間 部	樹冠縁下部	樹 下 部
0~10 cm層	2.3	1.7	1.0*
10~20 "	2.0	1.4	1.0
20~30 "	1.7	1.3	1.0

* それぞれ樹下部における値を1.0とする。

な多くの測点を設けることは困難な場合が普通であろう。そのようなときに、上述の部位を中心に測定を行なって平均ET値を把握すればそう大きい誤差は生じないと考えられる。

また、ガラスブロック、テンショメータなどによる土壌水分測定はいわゆる点計測であるから、計測点の代表性のいかんによっては、土壌条件の不均一な実際のホ場では大きな誤差を生む場合が考えられる。そこで、ある大きさの土壌ブロック全体の水分を連続的に計測できる中性子水分計のこの分野での実用化に期待が寄せられる。

5-3 各試験ホ場における平均日消費水量(平均日ET)について

(1) 日消費水量の構成要素

日消費水量は、気象条件一定ならば根群域内保留土壌水分量に大きく影響されることを知った。また、日ETは気象要素と何らかの関係をもつことも明らかであるが、現在これら土壌水分、気象要素とから日ETを合理的に定量的に算出する方法は見出されていない。ET量と気象要素(例えば月平均気温など)のみとの関係を与える式はThornthwaite,

Blaney-Griddle らによって提出されているが、これらの経験公式は土壌水分保留量に関する項を持っていないので、土壌水分状態が平均値としてとらえられる、たとえば月平均ET値を算出する場合には意味があるが、日々のET変動を求めたいときには大きな誤差を生ずるであろう。^{11, 19, 20)}

4カ所の試験ホ場における土壌水分追跡法で得た日ETデータは各日における土壌水分保留量はもちろん、気象要素としてホ場内あるいはホ場近傍における計器蒸発量値をも具備しているので、これらのデータからこの2者を要素とする多重線型回帰式により日ET量算出式を求めた。

土壌水分量としては有効土壌水分保留率 (S_M)

$$S_M = (\theta_{wv} - C.M.E.) / (F.C. - C.M.E.)$$

ここに θ_{wv} : 各深さの含水比 (体積)

F.C. - C.M.E. を有効水分と規定

を考え、土層30～35 cmまでについて各層ごとに計算した。

気象要素としては標準 ($\phi = 20$ cm) の蒸発計蒸発量 (E_0) をとった。その他の要素としては、例えば平均気温、日射量、風速などの気象要素、圃の地形傾斜方向などの環境要素、ミカン生育時期、着葉数などの作物条件を考慮すべきであったが、気象要素と環境要素は総合的な気象環境指標としての E_0 に包含させ、作物条件は適当な定量的表現の困難なことから、永年常緑作物であって時期的変化が比較的小さいことから、すべて考慮外とした。

ET, S_M , E_0 の日データを試験ホ場別に、最小自乗法によって多重線型分析して次の回帰式を得た。

	回 帰 式	単 相 関 係 数	
		ET- E_0	ET- S_M
粉 河 (40)	ET=0.762 E_0 + 3.76 S_M	0.448	0.322
遠 方 (40)	ET=0.355 E_0 + 3.01 S_M	0.353	0.340
かつらぎ (41)	————— *	0.078	0.431
荒 見 (41)	————— *	0.120	0.499
粉 河 (41)	————— *	0.136	0.459

* データが集中するために計算不能

以上のうち、粉河40年度のデータについて、 $ET \sim S_M$ 、 $ET \sim E_0$ の関係を Fig. I-16に示した。単相関係数は、いずれも低く0.322、0.448である。次に α_{ET} ($=ET/E_0$) $\sim S_M$ の関係を Fig. I-17にあげたが、相関係数は高い値とはいえない。

線型回帰式はそれ自身にあまり大きな意味はないが、測定データが信頼すべき値ならば、実用的な意味をもつことはできる。筆者は後述する日データを用いての有効雨量分析にこの結果を用いようとした。

(2) 各ホ場における月別日消費水量

各試験ホ場における月別の平均日消費水量の値を一括して Table I-8に挙げた。この表の値は、土壌水分範囲をF.C. (pF 1.5~1.8) \sim C.M.E. (pF 3.0)に保った場合の平均の値であって、雨天がつづいて長時間にわたって高水分(低水分張力)領域に保たれたときとか、カンガイ対象土層の平均水分が pF 3.0以上となったときとかのデータは除外した。

Table I-8によると、日ETのピークは普通8月にあらわれ、東斜面の深い表土をもつ荒見で5.3mmに達し、北斜面の特殊な土壌プロファイルをもつ遠方で3.5mmというひらきがある。本地域のピーク月平均値は4.8mmであった。 E_0 との比をとることは、前述のように、1カンガイサイクルの平均ETについては意味があると思われるので、月別に α_{ET} を算出すると、7~8月にかけて漸増増大してゆく傾向がうかがわれる。8~9月は葉が最も繁茂し、果実肥大が著しい時期に相当している。

ここで、こころみにETをEとT(蒸散量)とに分離(Fig. I-12からEを算出、残与をTとした)すると同表の右欄のとおりとなり、TはEの2~3倍で $\alpha_T = 0.3 \sim 1.4$ の範囲をとっている。前述の α_{ET} の時期的漸増傾向は主として α_T の増大によっていることがこの結果から明らかに認められる。すなわち9月の α_T は7月のその約2倍になっていることがわかる。これに対して α_E は土壌水分によってコントロールされ、月別変化はまったく認められない。

Tは土壌水分はもとより、生育段階、樹冠容積、着葉繁茂の状態などによってもまた影響を受け、単純に E_0 との比(α_T)のみをもって論ずることはできないから、今後時期別にもっとデータを集積して検討を重ねてゆくことが必要であろう。しかし、カンガイ計画に必要なETを求める場合には、必ずしもEとTを分離することは必要ではなく、現時点ではETは原則としてホ場での土壌水分変化追跡法により決定してゆく方向が正しい

ように思われる。

Table 1-8 蒸発散量 (ET), 蒸散量 (T)
土壌面蒸発量 (E) の月別平均値

	月	ET		T		E		E ₀
		ET (mm)	α_{ET}	T (mm)	α_T	E (mm)	α_E	
粉	7	4.4	0.90	3.0	0.61	1.4	0.29	4.9
	8	5.2	0.95	4.1	0.75	1.1	0.20	5.5
	9	4.6	1.70	3.7	1.37	0.9	0.33	2.7
	10	2.4	1.14	1.8	0.86	0.8	0.28	2.1
河	7	3.5	0.58	1.9	0.32	1.6	0.26	6.0
	8	4.2	0.82	2.8	0.55	1.4	0.27	5.1
	9	4.2	0.95	3.2	0.73	1.0	0.22	4.4
荒	7	4.6	0.77	2.9	0.49	1.7	0.28	6.0
	8	5.3	1.02	3.7	0.71	1.6	0.31	5.2
	9	6.0	1.43	4.5	1.07	1.5	0.36	4.2
見	7	3.2	0.51	1.4	0.22	1.8	0.29	6.3
	8	5.8	1.05	3.8	0.69	2.0	0.36	5.5
	9	3.9	0.80	2.5	0.51	1.4	0.29	4.9
かつらぎ	7	3.1	0.49	1.8	0.29	1.3	0.20	6.3
	8	3.5	0.61	2.0	0.35	1.5	0.26	5.7
	9	3.0	0.94	2.1	0.66	0.9	0.28	3.2
遠方	7	3.8	0.64	2.2	0.37	1.6	0.27	5.9
	8	4.8	0.89	3.3	0.61	1.5	0.28	5.4
	9	4.3	1.10	3.2	0.82	1.1	0.28	3.3
平均	7	3.8	0.64	2.2	0.37	1.6	0.27	5.9
	8	4.8	0.89	3.3	0.61	1.5	0.28	5.4
	9	4.3	1.10	3.2	0.82	1.1	0.28	3.3

6 総 括

本章では土壌水分減少過程にみられる諸特徴について、垂直的、水平的部位による差異を中心に述べて、畑地カンガイ計画に応用してゆくべき次のような新しい知見を得た。

(1) カンガイによって土層に保留された水分の減少過程は深さによって特徴的な経過をたどる。表層 (0~10 cm) の水分はカンガイ後急速に失われて一般に5~6日経過す

るとすでにC.M.E.に達し、とくに表層5 cmまでの乾燥は著しくシオレ点(W.P.)に達するようである。下層(20~30 cm)の水分はこれとは逆に初期の乾燥速度は小さいが、数日経過して表層との水分コウ配が増大する時点から乾燥速度を早めて、7~8日経過するとC.M.E.に近づいてゆく。土壤水分の減少が明らかに生じるのは一般に40 cm付近までで、カンガイ開始時点において40 cm層までの見かけの水分消費割合は上から40:30:20:10のような値を示す場合がみられる。

(2) 直径2 mm以下の細根の垂直分布をみると、全体の90%に及ぶ量が20 cm層までに分布しており、浅根性は明確な特徴である。水平分布をみると、樹幹近傍にきん少であるほかはほとんど均一であるといつてよく、樹間部に約50%、樹冠に覆われた部分に約50%という分布が一般的な型である。

(3) (1)で述べた20~40 cm層の水分は表層との水分コウ配が大きくなった時点から変動を開始してゆくが、この現象を根群分布量と対比してみると、水分変動量の多くは直接元の位置から根群に吸水されるのではなく、表層への毛管上昇移動による水分補給に基づくものと解釈される。この量は土層の配列状態に大きく影響されて、L-C, L-L, L-G型の順に大きくてそれぞれ15~23, 10~15, 7~9%と推定される。

このような土壤水分減少過程の特性から、実際問題としてカンガイ計画をたてる場合に必要な有効土層について次のような事項を導くことができよう。

a. 有効土層(カンガイ土層)は得る主根群分布域と考えてよい。L-C, L-L型では30 cm, L-G型では20 cmぐらいにとればよい。このような場合、カンガイ開始時期の判定には、有効土層の平均の土壤水分がC.M.E.に達した時を指標とすればよいであろう。

b. 降雨の有効利用を考慮し、降雨の有効保留域を土壤水分の変動する土層と考えればよいであろう。ただし、L-G型の場合には有効土層と降雨有効保留域を同一深さと考えなければならない。

このように土層配列のタイプによってカンガイの“型”を大略定めることも可能である。

(4) ミカン園では土壤水分消費の水平部位による差異にも注目すべきで、樹間部では樹下部の約2倍の水分変動が生じており、土壤水分消費型も大別して樹間部(樹冠縁下部を含む)の40:30:20:10(層位型)、樹下部の30:25:25:20(均一型)という差異が認められるようである。

(5) ETは気象条件はもとより、より多く土壤水分保留量に規制され、7~8月にはカ

ンガイ直後の6~7mm/day から8~9日経過後の2mm/day前後まで変動する。
したがって、ET算定には土壤水分保留量という要素を除外してはならない。ETとそれ
に対応する土壤水分保留率 (S_M) と計器蒸発量 (E_0) の日データから最小2乗法によ
る線型回帰分析をして次の回帰式を得た。

$$\text{粉 河 (40)} \quad ET = 0.762 E_0 + 3.76 S_M$$

$$\text{遠 方 (40)} \quad ET = 0.355 E_0 + 3.01 S_M$$

(6) カンガイ計画の基本数値たる消費水量は原則としてホ場における土壤水分変動追跡
法によらなければならない。紀の川沿岸各試験ホ場における7, 8, 9月の消費水量の実
測データを挙げた (Table I-8)。これらの値は土壤水分をF.C.~C.M.E.に保
った場合のカンガイサイクルにおける平均値である。

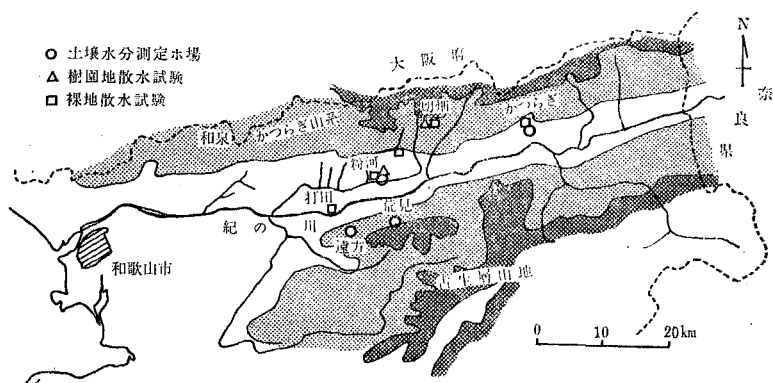


Fig. 1-1 試験ホ場の位置

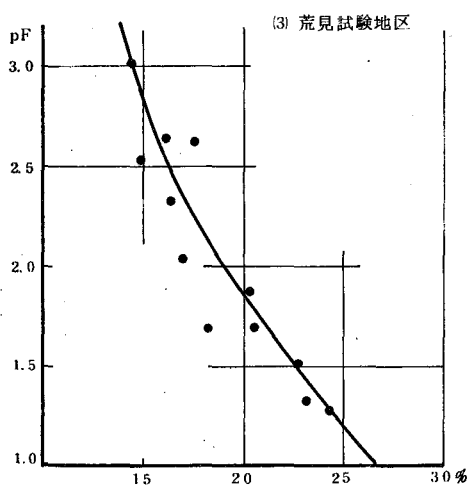
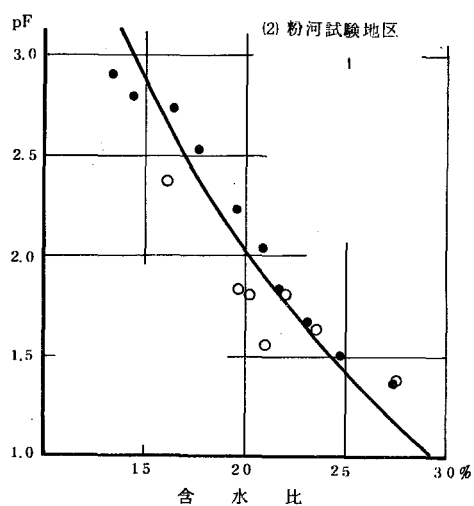
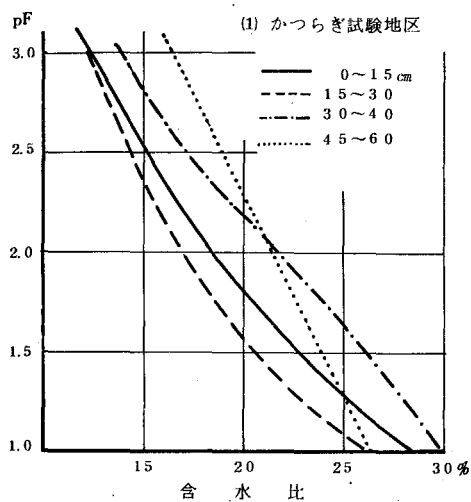


Fig. 1-2

土壌水分張力 (pF) ~ 含水比曲線

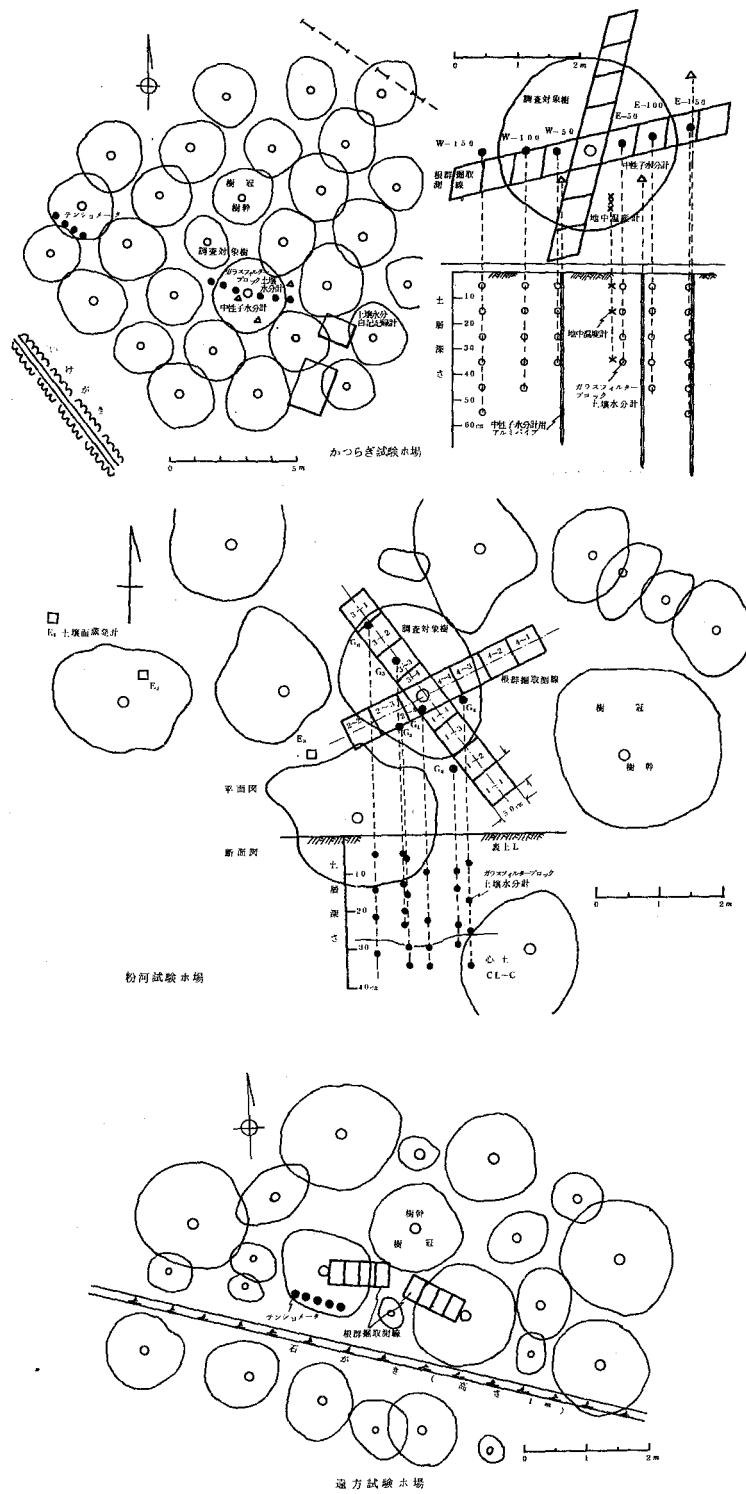


Fig. 1-3 各試験水場における土壌水分測点平面および断面図

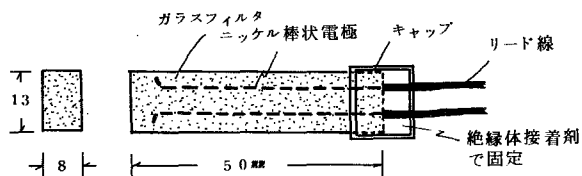


Fig. 1-4 ガラスブロック土壌水分計構造図

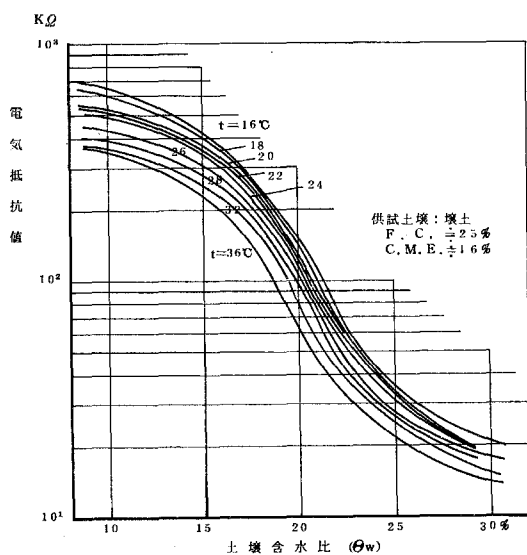


Fig. 1-5 ガラスブロック土壌水分計の温度特性

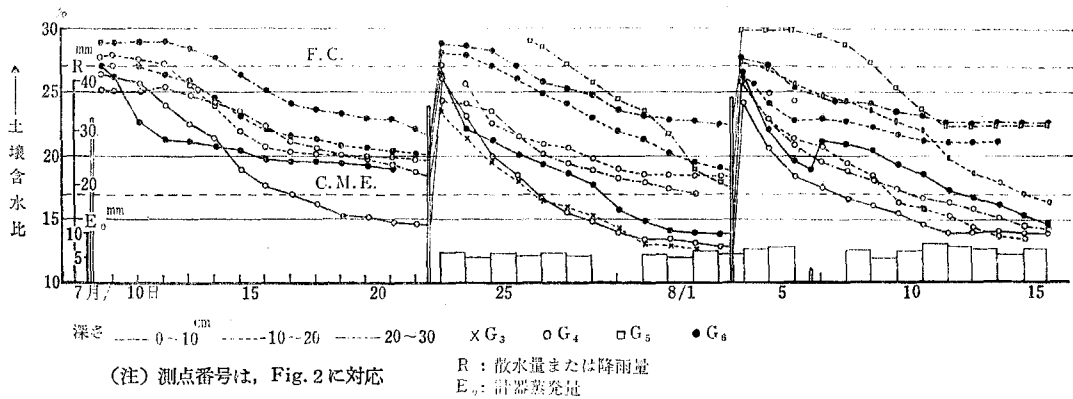


Fig. 1-6 土壌水分乾燥過程 (粉河)

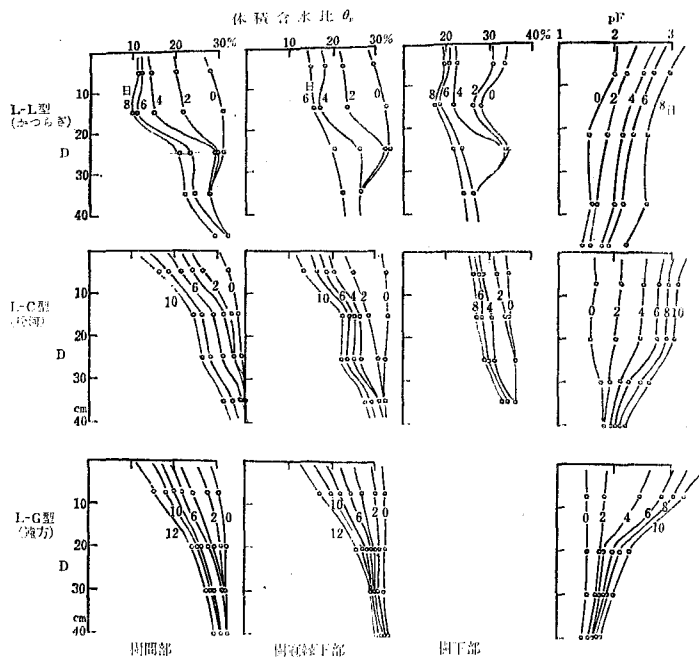


Fig. 1-9 土層配列別，測点水平部位別土壌水分プロフィール

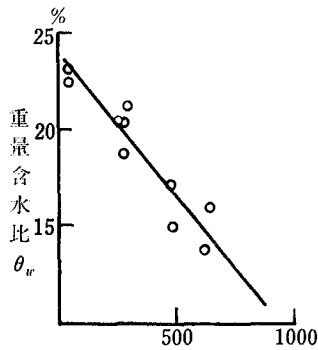


Fig. 1-10 (1) R_b
土壌水分乾燥極限と根群分布量との関係

R_b : $50 \times 50 \times 10$ cm 土壌ブロック中の根群量 (表面積) cm^2
 θ_w : カンガイ開始時土壌含水比 (重量%)

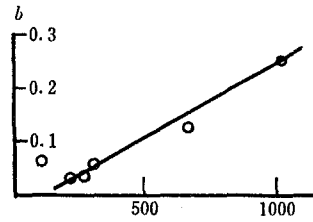


Fig. 1-10 (2) R_b
土壌水分乾燥速度と根群分布量との関係

b : $\theta_w = aT^{-b}$ θ_w : 重量含水比 (%), T : 経過時間 (hr.)
 a, b : 定数

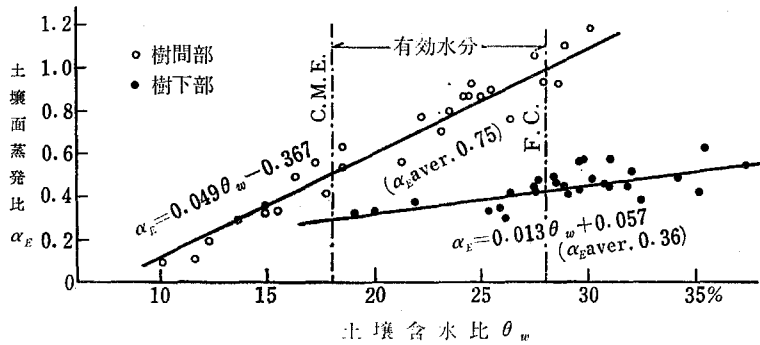


Fig. 1-12 土壌含水比 θ_w と土壌面蒸発比 α_E との関係

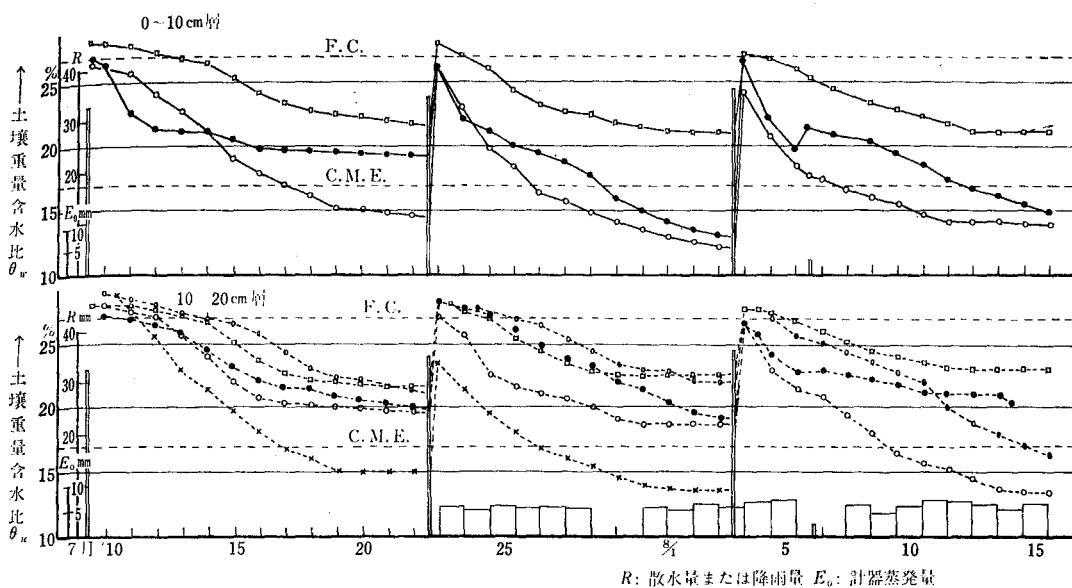


Fig. 1-11 土壤水分乾燥過程における水平部位による差異

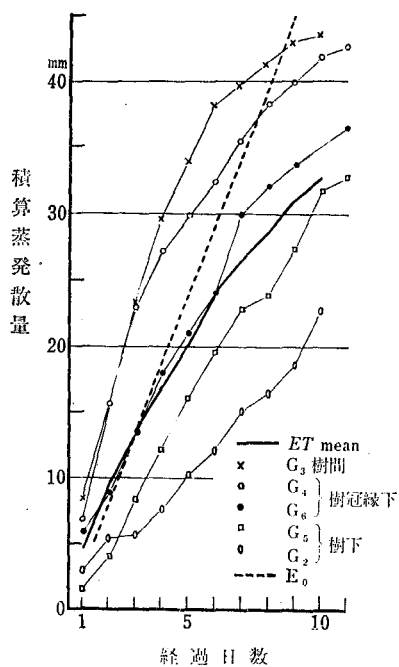


Fig. 1-13 ETの経日変動(粉河)

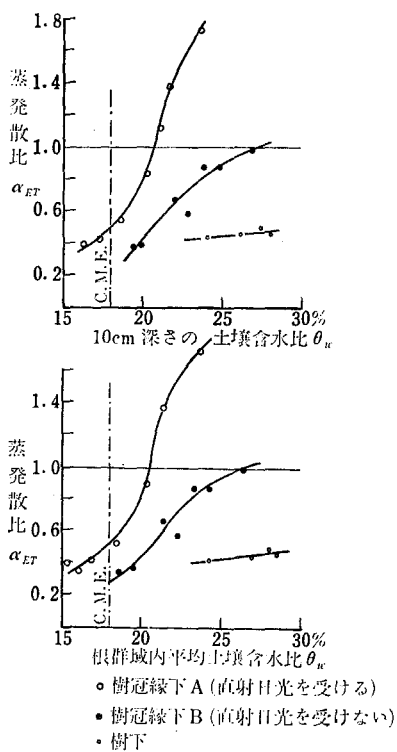


Fig. 1-15 蒸発散比 α_{ET} の減衰

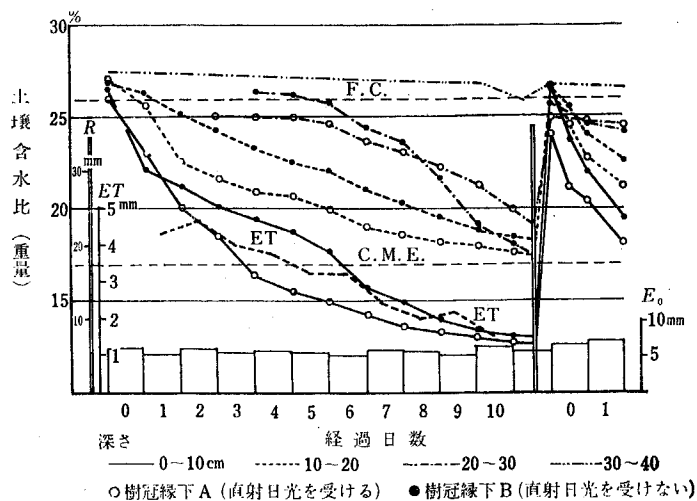


Fig. 1-14 土壤水分状態とET減衰の関係(粉河)

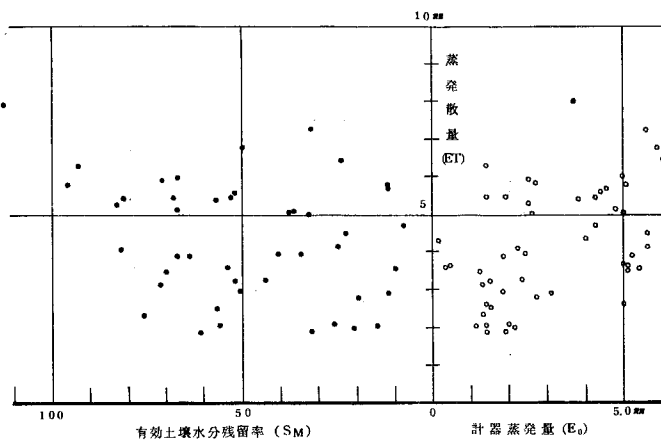


Fig. 1-16 有効土壌水分残留率と蒸発散量 (ET) および計器蒸発量 (E_0) と蒸発散量 (ET) との関係

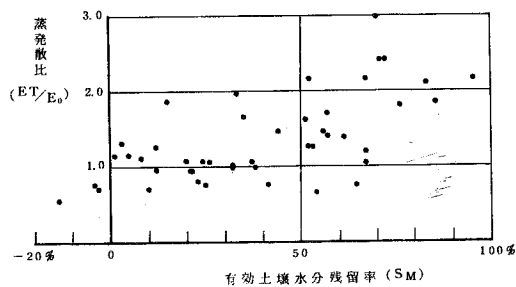
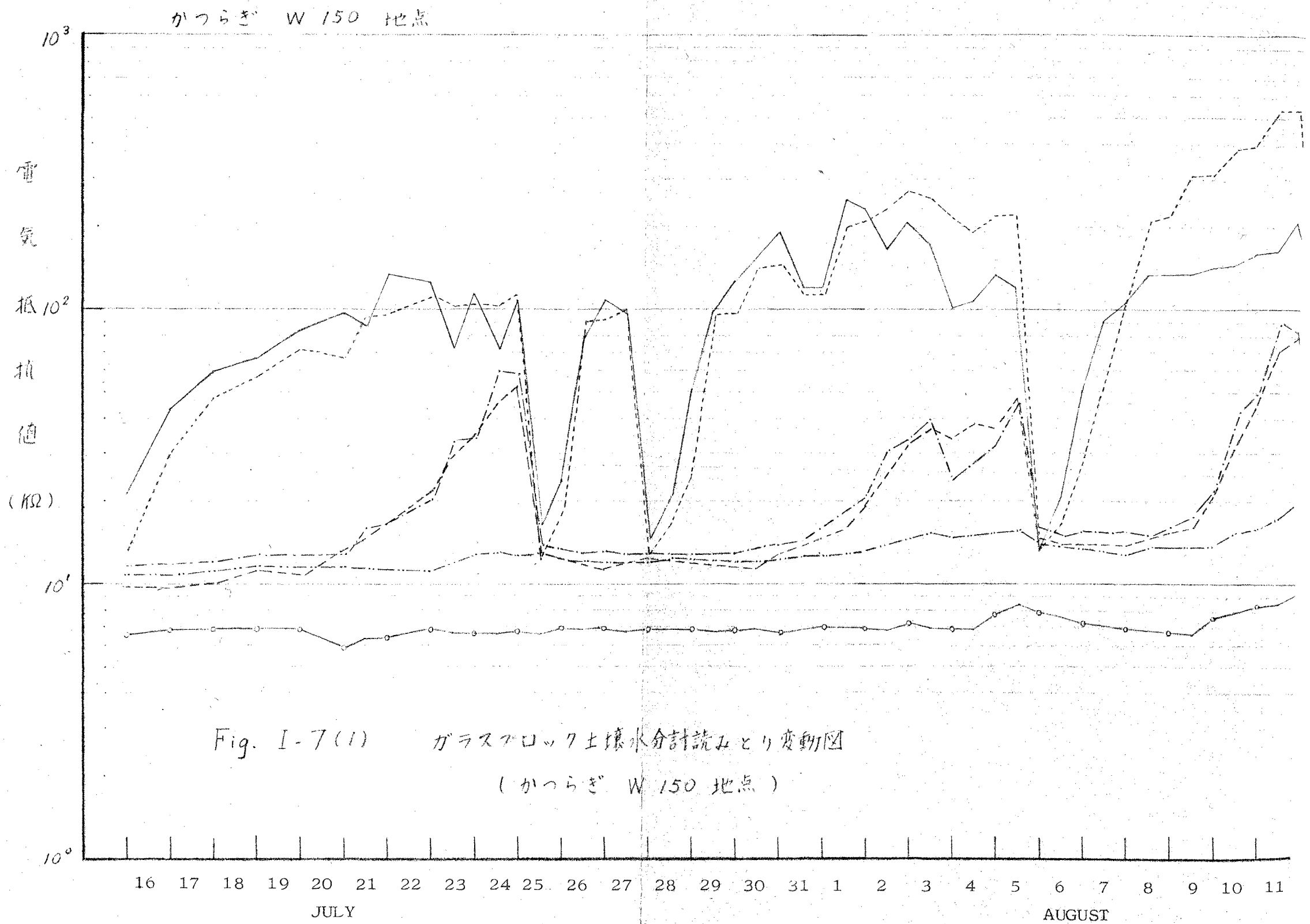
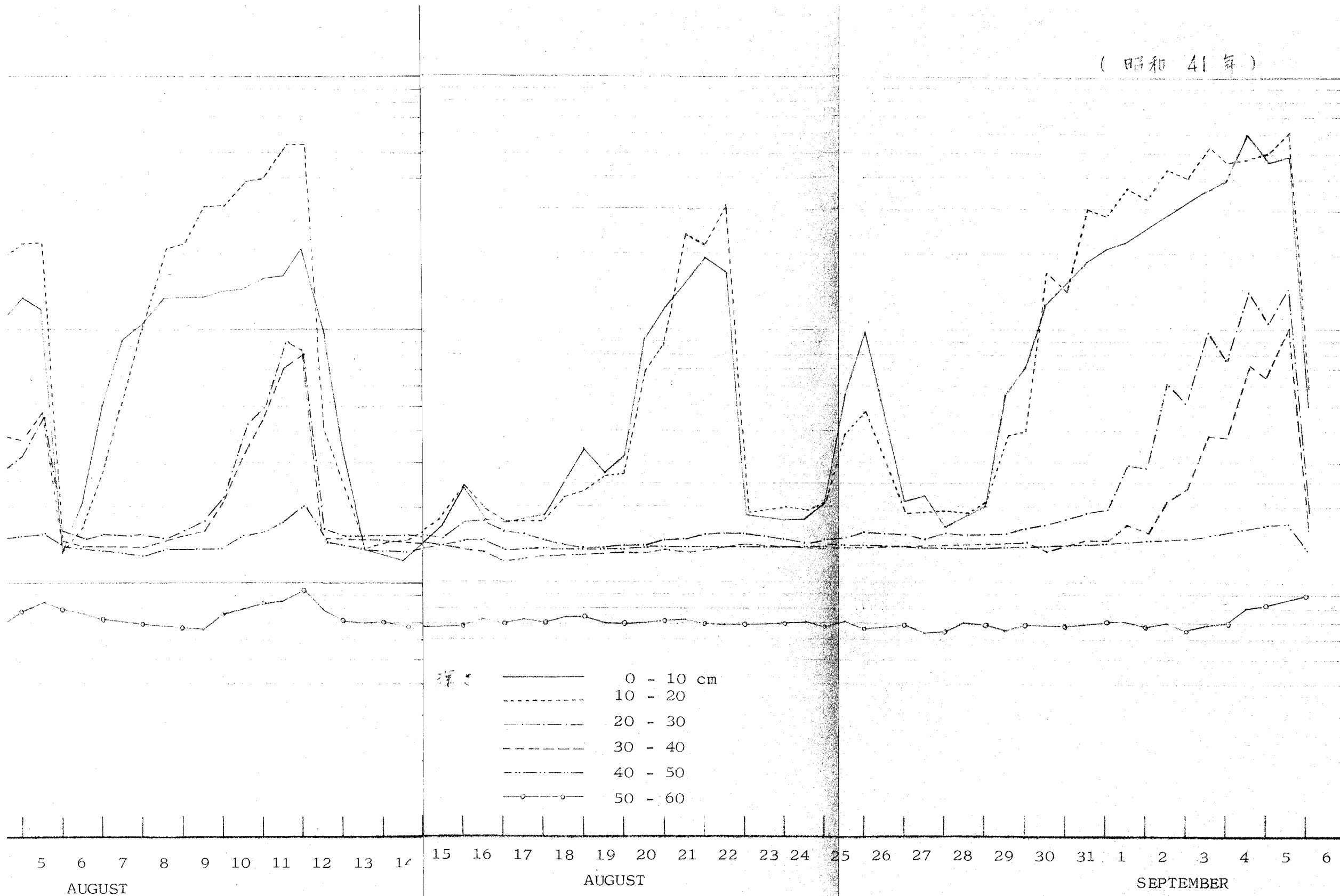
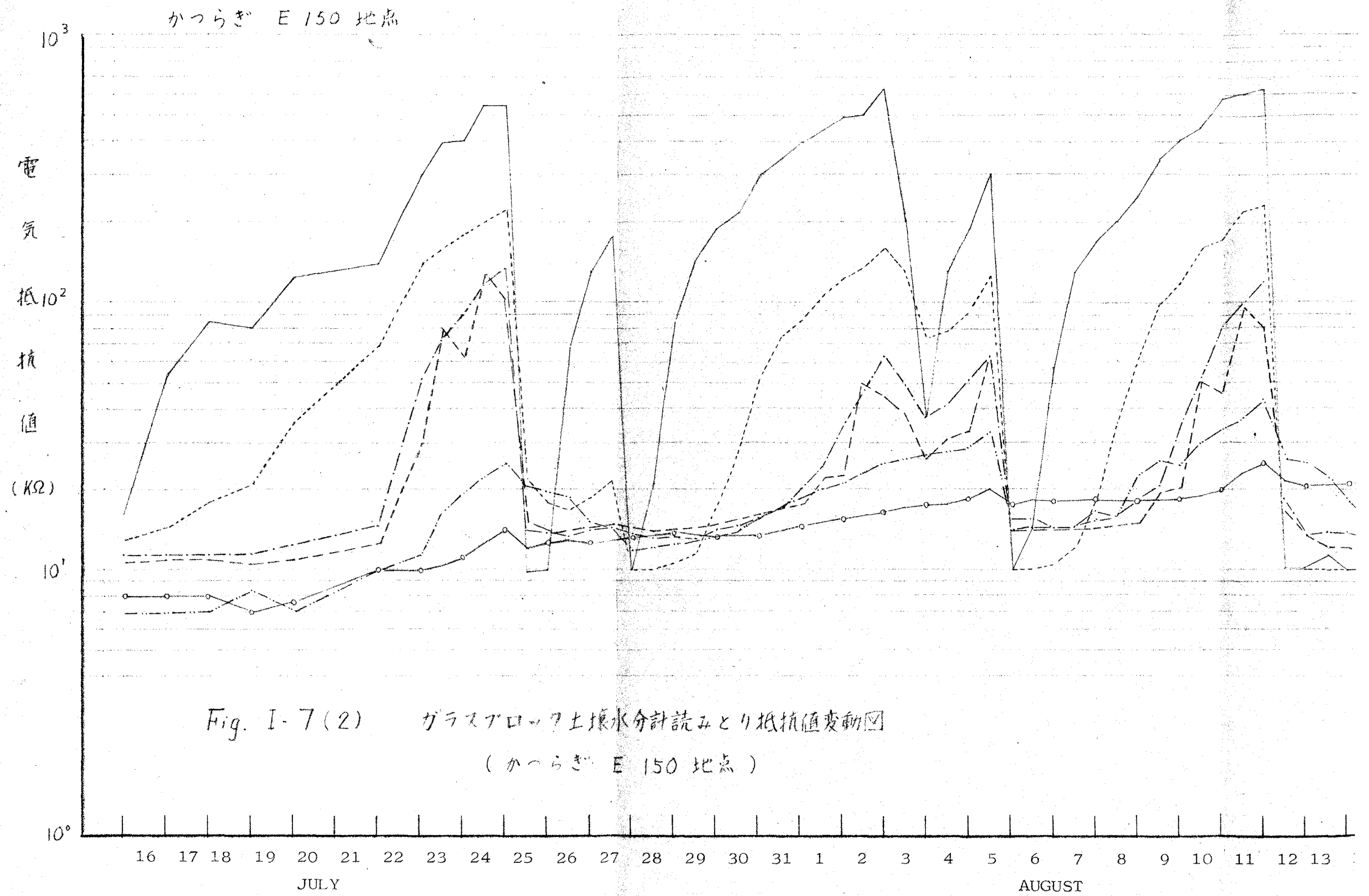


Fig. 1-17 蒸発散比 (α_{ET}) と有効土壌水分残留率との関係 (粉河40年)

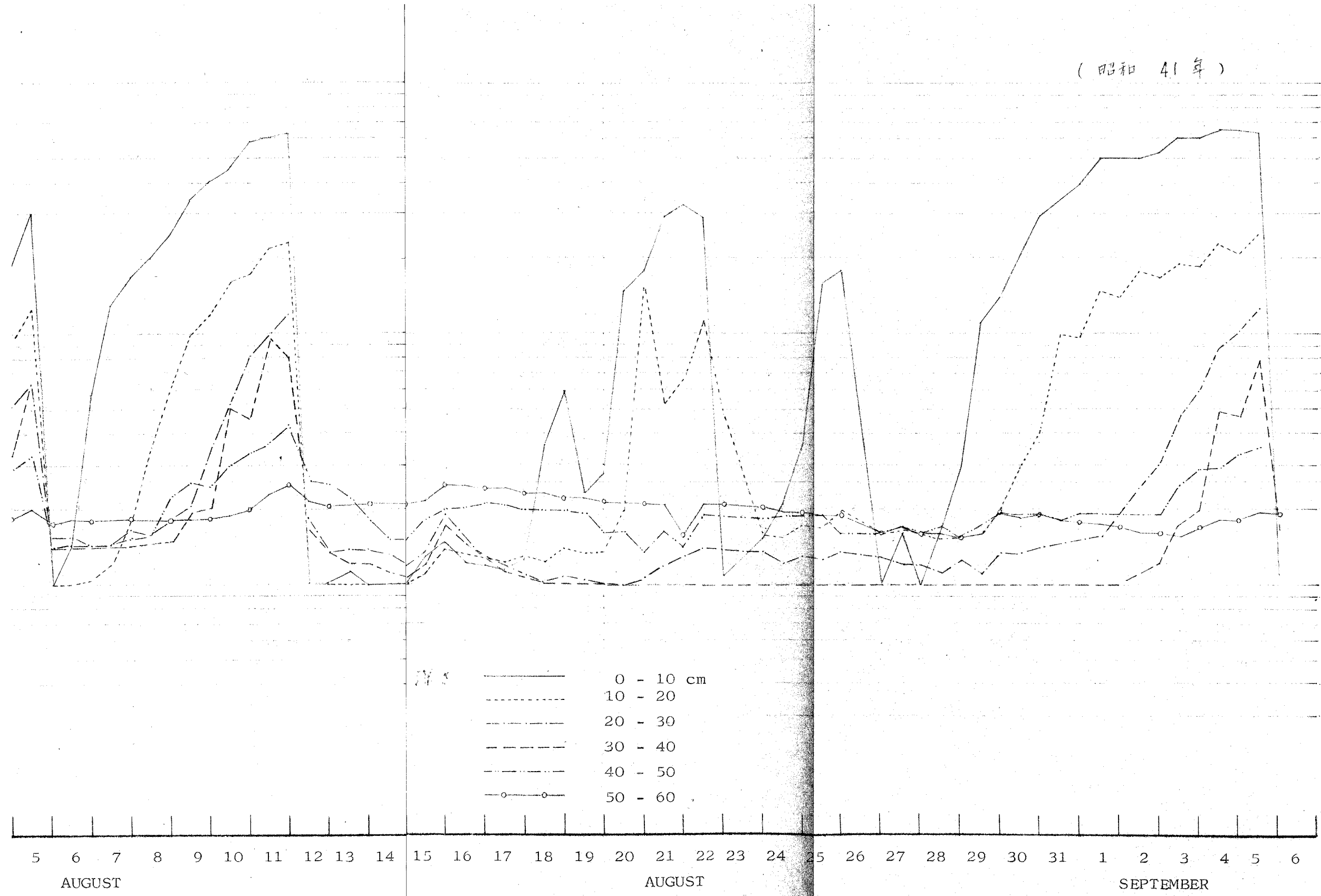


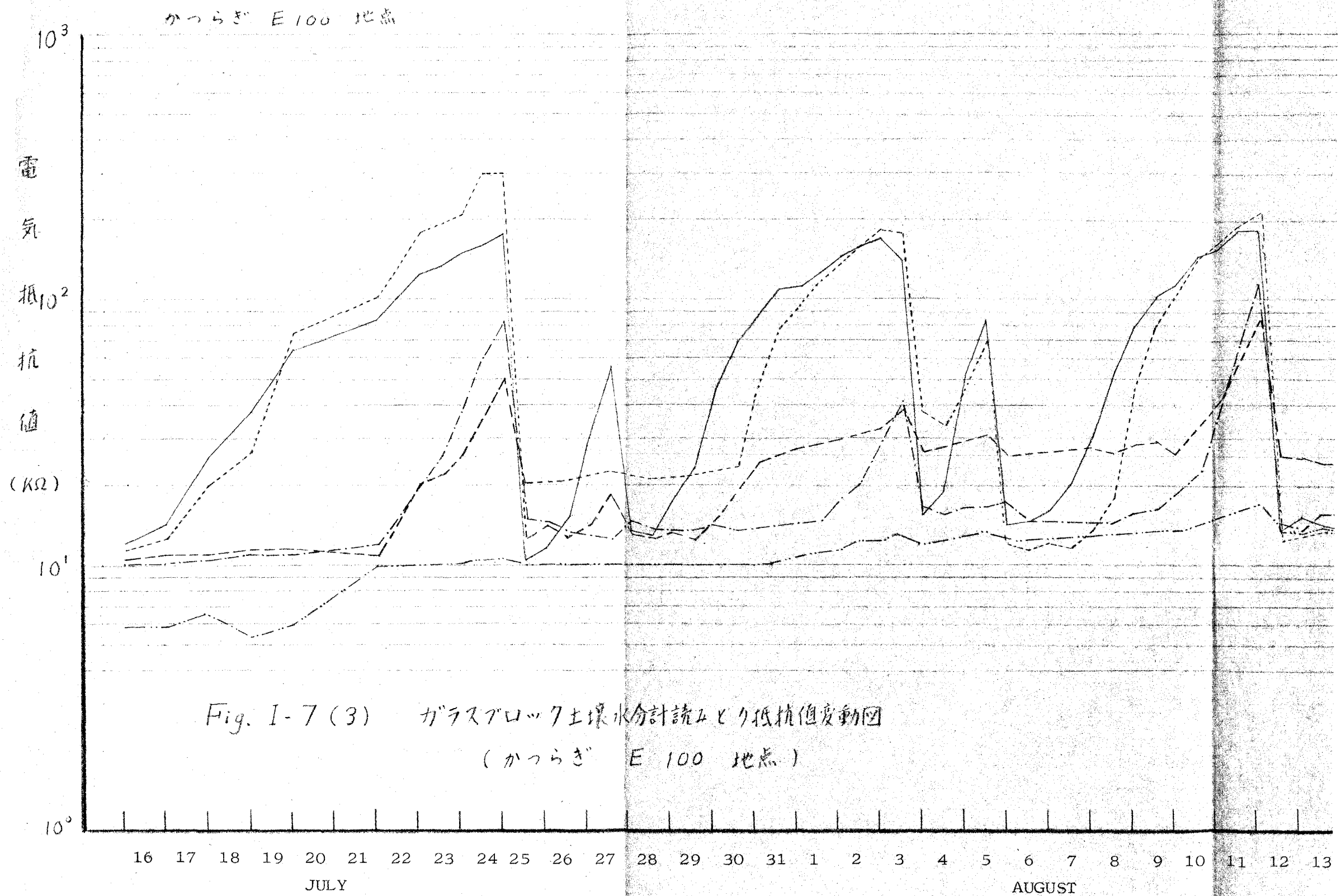
(昭和 41 年)



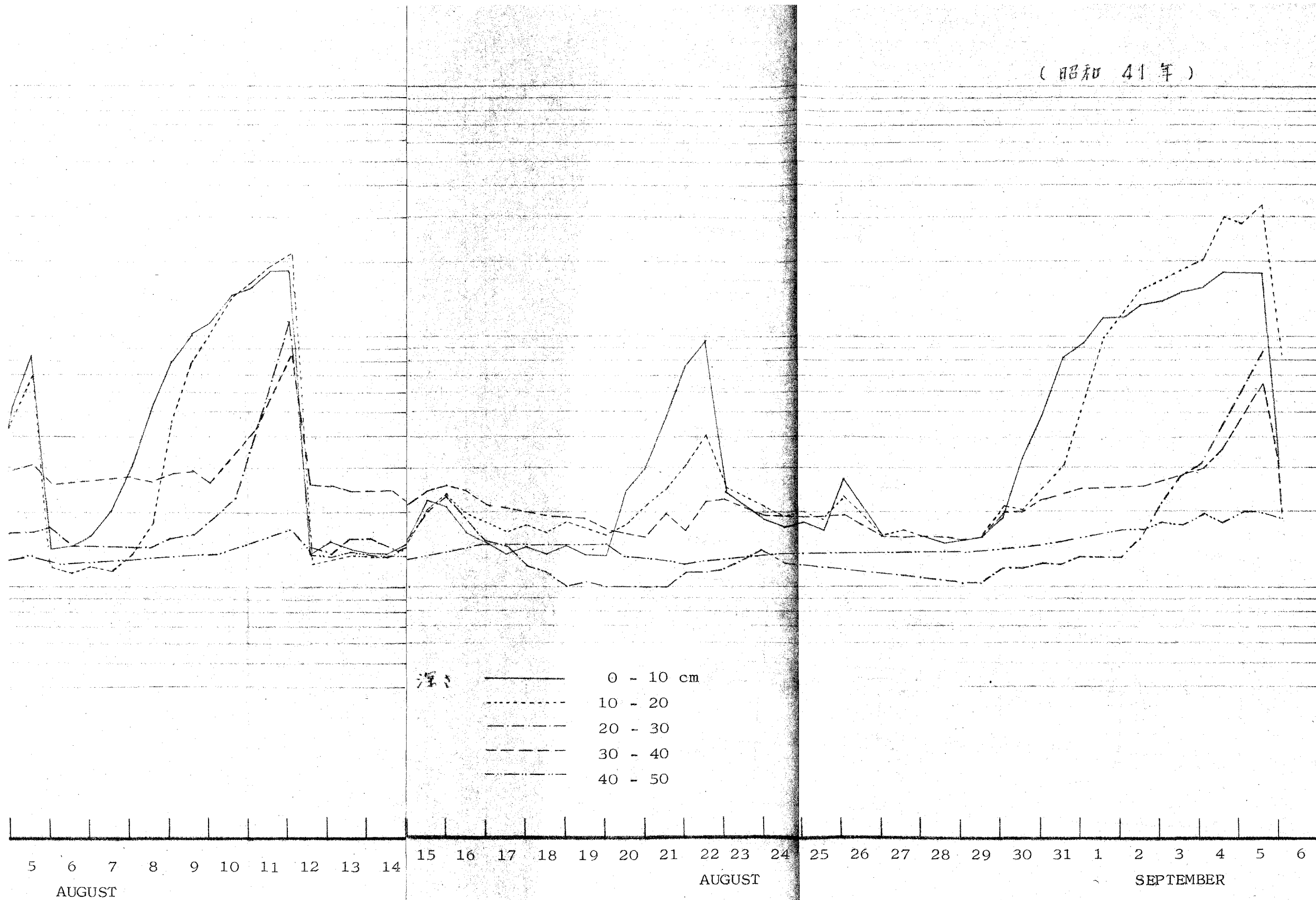


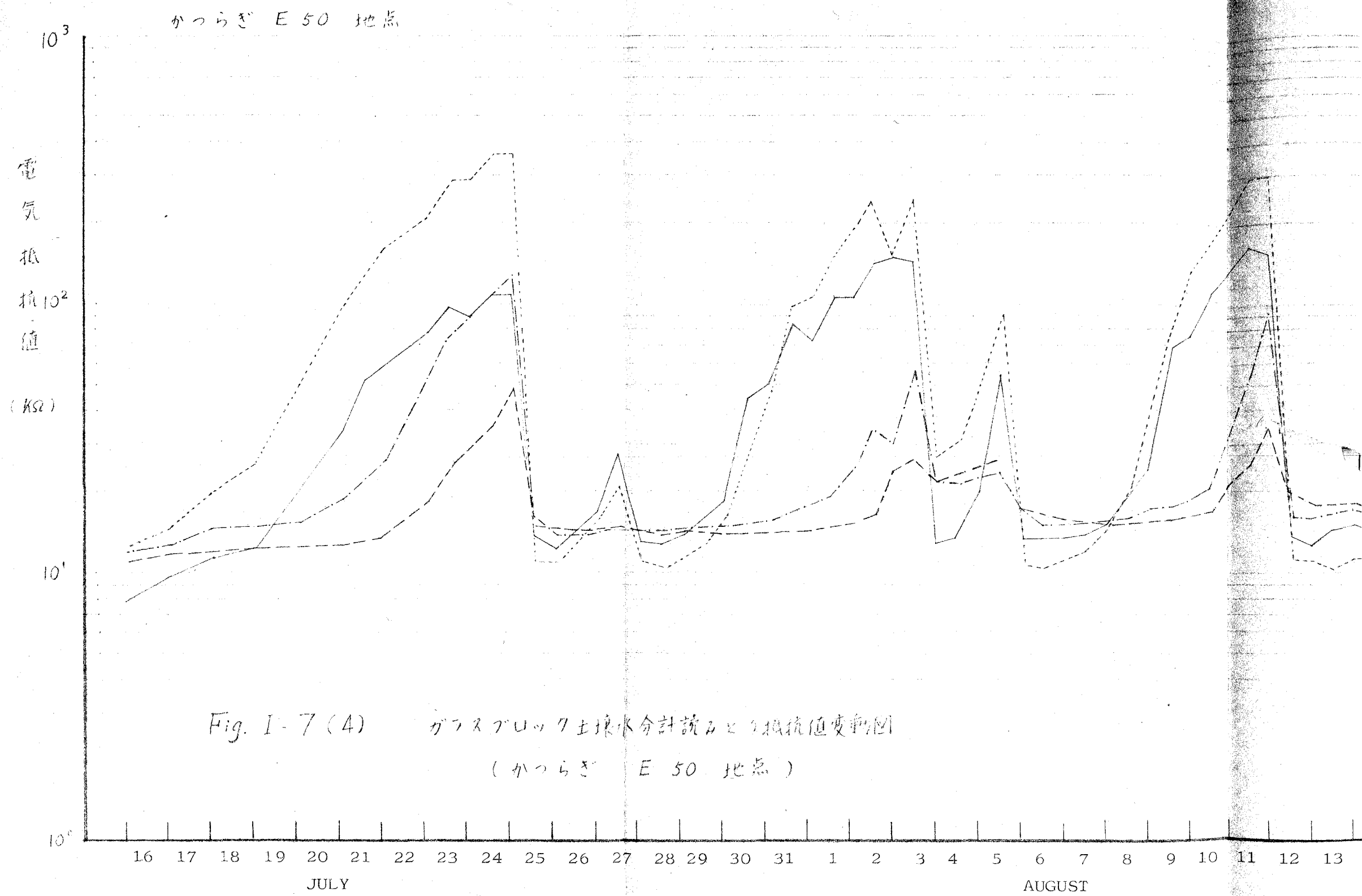
(昭和 41 年)





(昭和 41 年)





(昭和 41 年)

深さ

——	0 - 10 cm
- - - -	10 - 20
— · — ·	20 - 30
- - - -	30 - 40

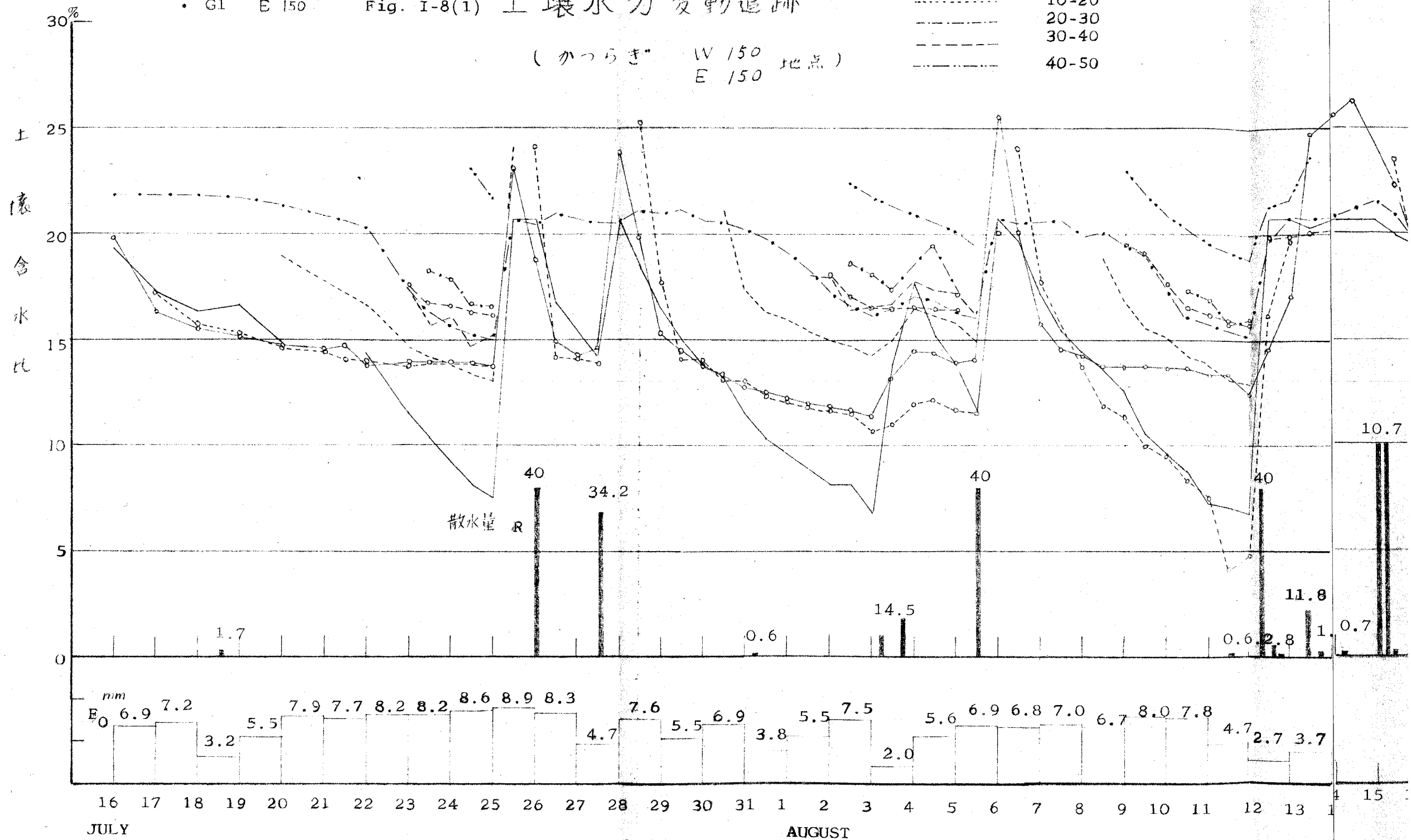
5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6

AUGUST AUGUST SEPTEMBER

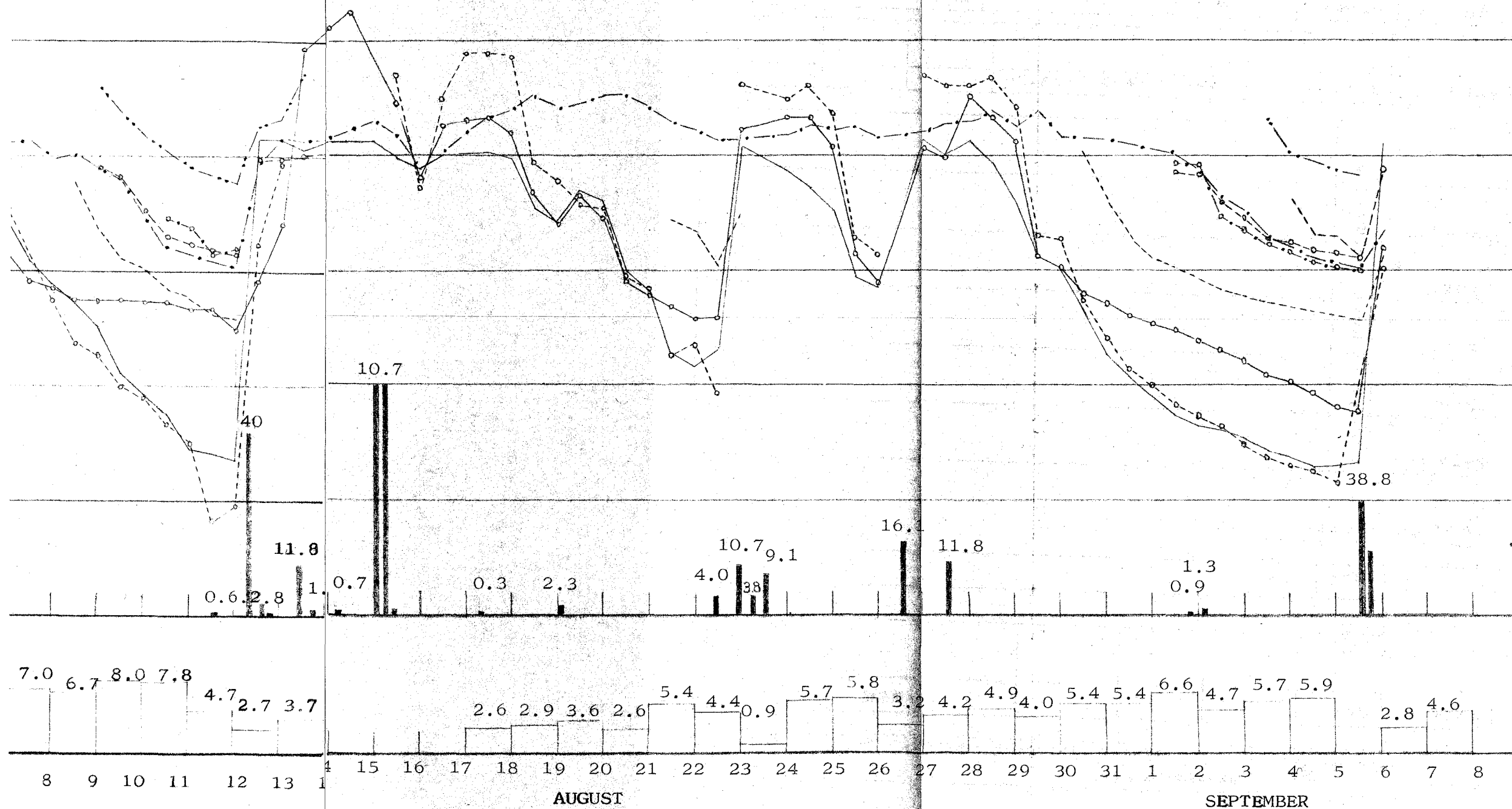
• G1 E 150

(かつらぎ) W 150 地点)
E 150

深 0-10 cm
10-20
20-30
30-40
40-50



0-10 cm
10-20
20-30
30-40
40-50

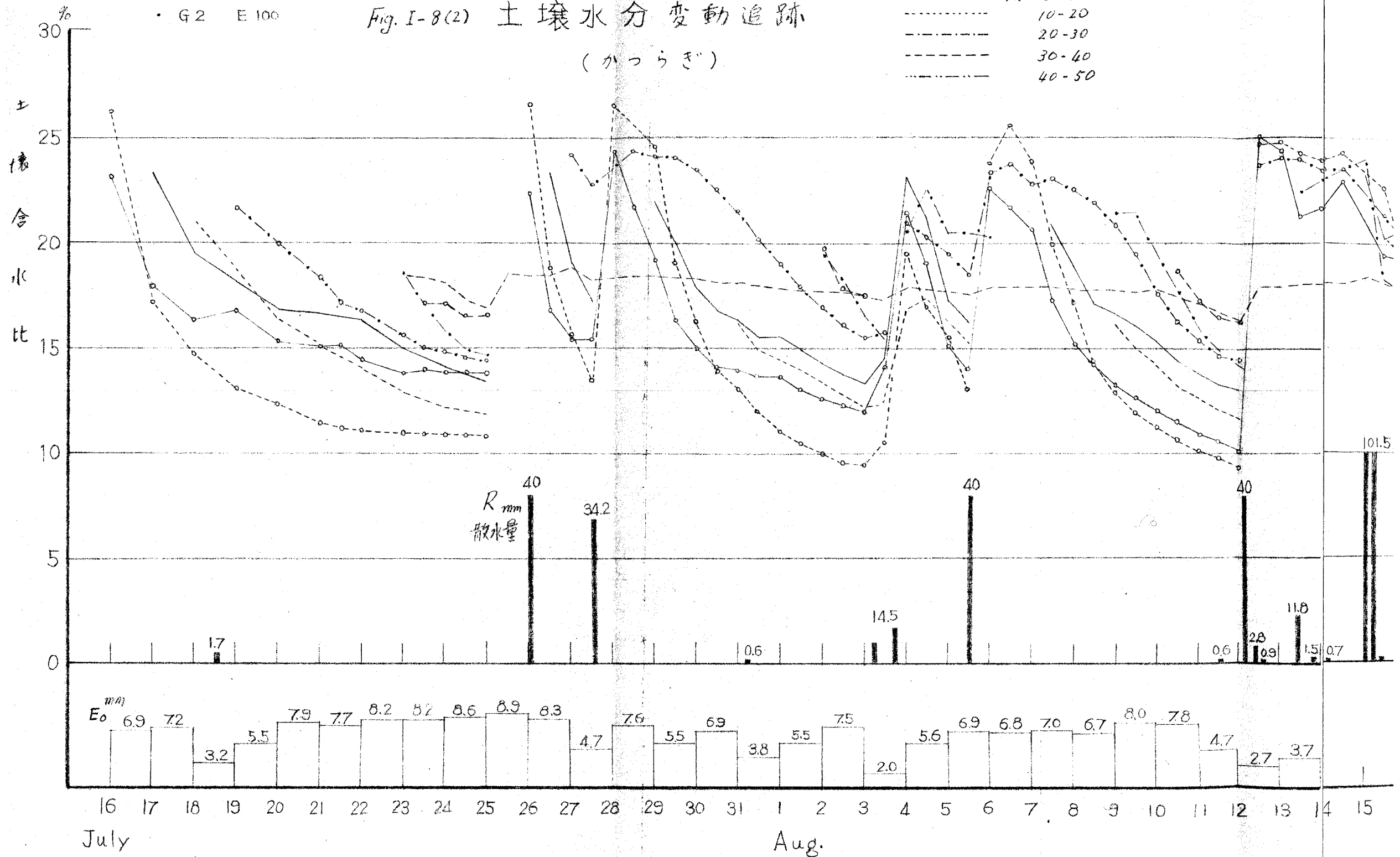


○ G5 W 100
 ● G2 E 100

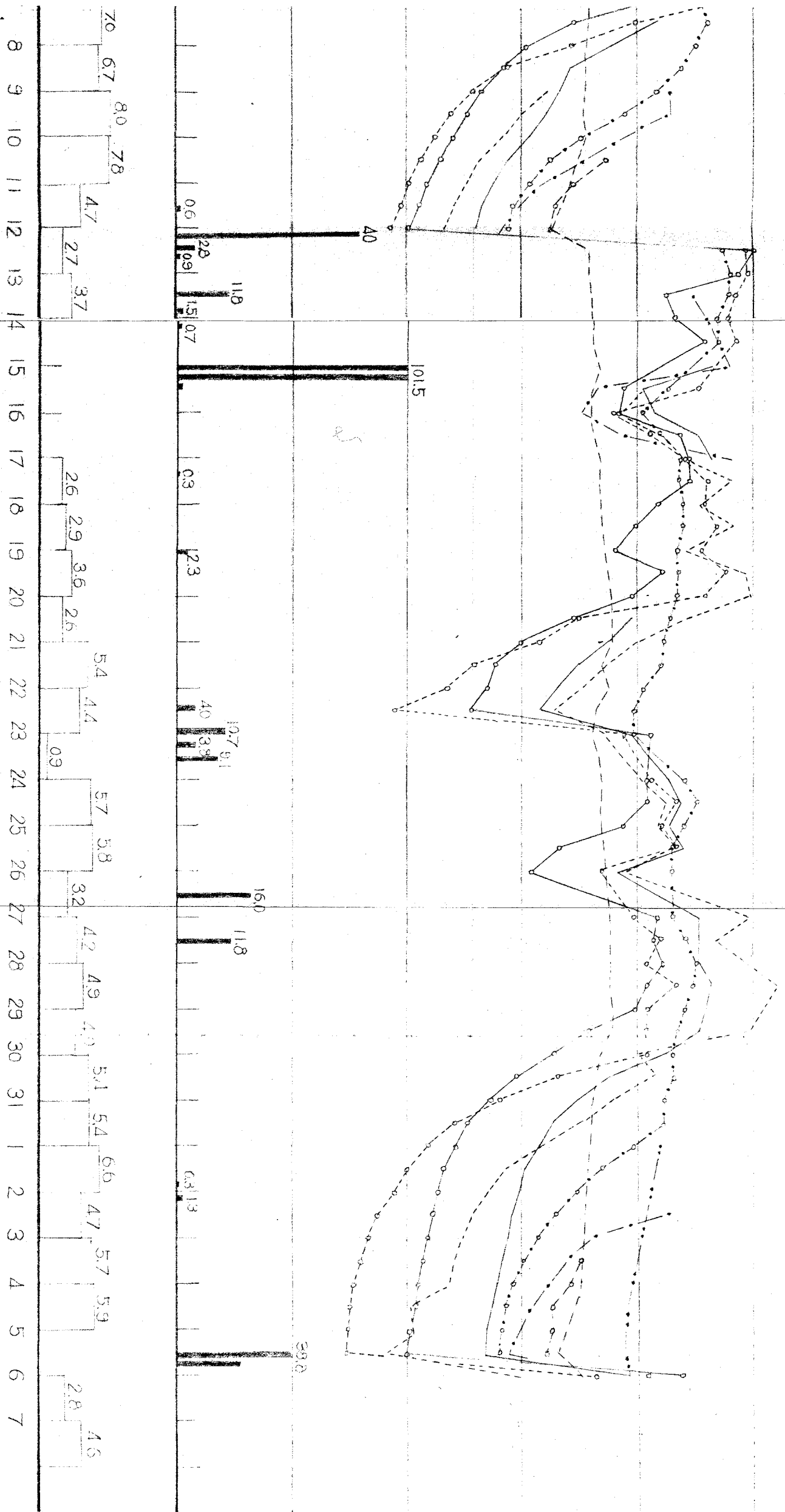
Fig. I-8(2) 土壤水分変動追跡

(かつらぎ)

— 深 0-10 cm
 - - - 10-20
 - - - 20-30
 - - - 30-40
 - - - 40-50



0-10 cm
10-20
20-30
30-40
40-50



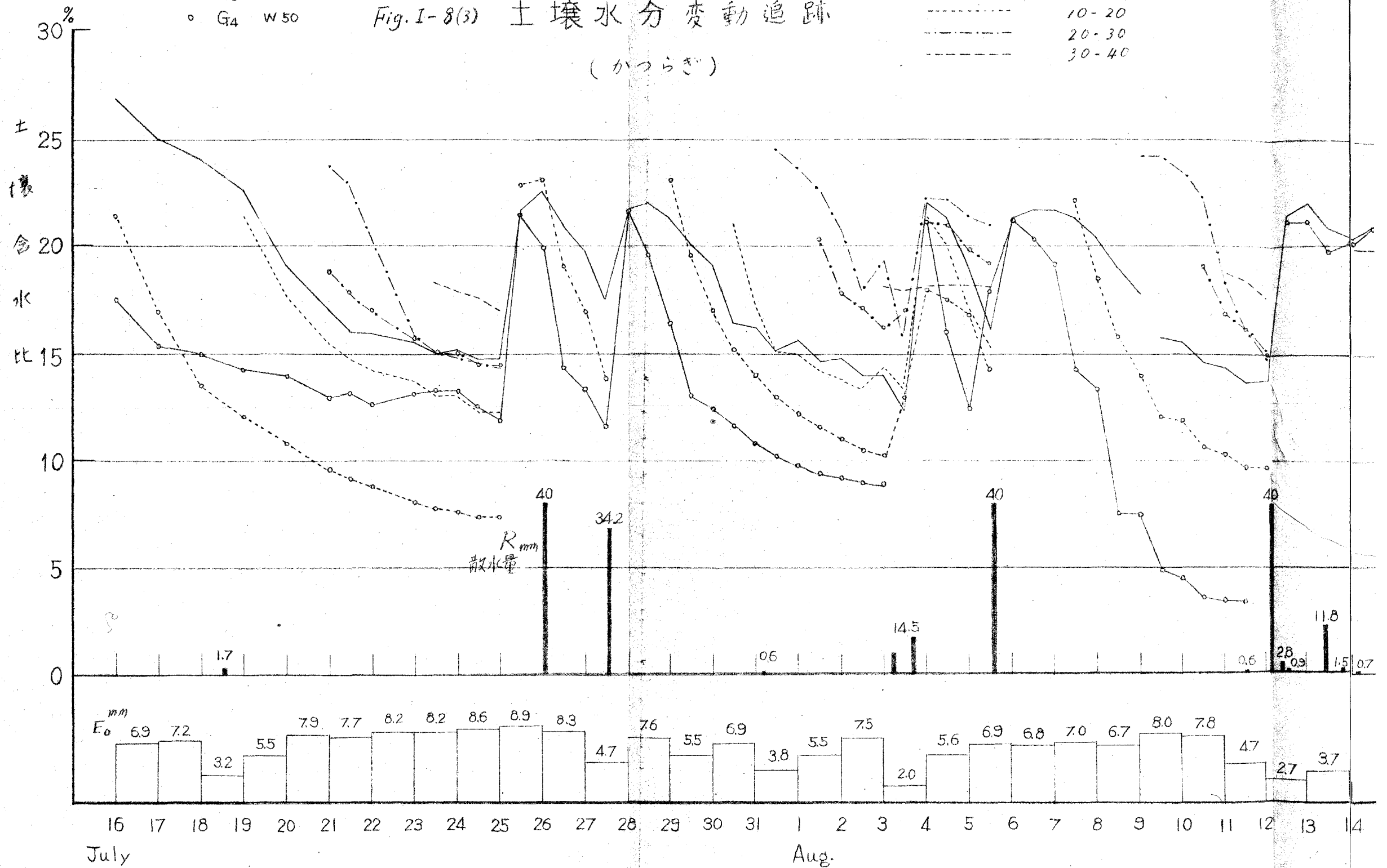
Sept.

• G₃ E 50
○ G₄ W 50

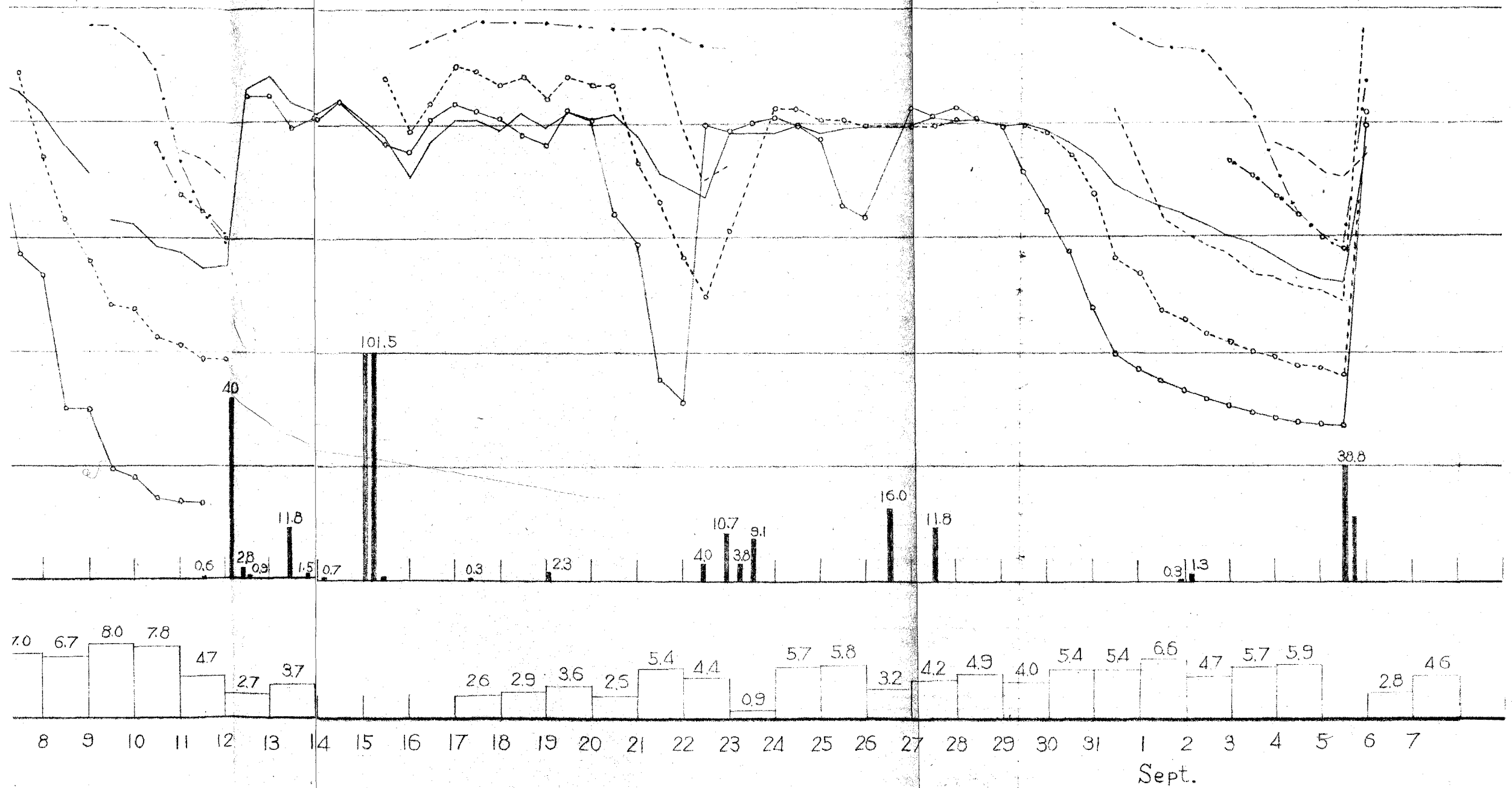
Fig. I-8(3) 土壤水分變動追跡

(かつらぎ)

— 深さ 0-10 cm
- - - 10-20
- - - 20-30
- - - 30-40



0-10 cm
10-20
20-30
30-40



Ⅱ カンガイの効果について

1 ま え が き

わが国のような湿潤地帯における畑地カンガイの目的は旱害防止による増収、生産安定効果はもとより、最大生産をあげ得るような水管理を行なえることを第一義としなければならぬという論義が多い。^{1,2,3)} また、ミカンのような永年果樹作物に対するカンガイの効果はまず旱害防止による増収という面と、樹勢を維持して隔年結果を防ぐこと、幼木の生長を促進し採果開始年を早めることなどの生産面での効果と、散水カンガイシステムを利用しての液肥散布、薬剤散布、その他薬剤溶解に必要な雑用水や生活飲雑用水の供給など多目的な水の供給配分、ということなども考えられなければならないと思われる。

このように認識しながらも、本章では、カンガイの直接的効果である果実肥大に及ぼす土壌水分状態の影響、増収効果、および品質面への効果に限定し、若干の資料に基づいて考察する。

2 土壌水分と果実肥大について

粉河試験ホ場 (Fig. I-3 に示した場所に隣接した傾斜ミカン園) においてテンショメータによって土壌水分変動を追跡した供試樹につき、胸高外周位置 10 cm の果実の横径を毎日朝 6 時に測定した。供試樹は 7 年生の若木と 28 年生の成木であり、樹齢による差異をも明らかにしようとした。

果径肥大量および肥大量の変動係数を土壌水分状態 (それぞれ 10, 20, 30 cm 深さにおける pF 値) と対比させて Fig. II-1 のような結果を得た。果実肥大は降雨またはカンガイの後一兩日に著しい増加を示し、その後土壌水分の減少に伴って増加量を減ずる傾向にあったが、肥大量の著しい減少を示すと共に変動係数が急激に増大する時期は、主たる根群の分布域 (成木では 10 cm, 若木では 15-20 cm 付近) の土壌水分が pF 2.7 に達するときであることがわかった。このような果実肥大抑制の生じる時点 (初

期および著しく抑制する時点)のpF値を深さ別に整理したのがTable II-1である。成木では比較的浅い土層,若木では比較的深い土層の水分保留量に支配されるように観察されたのであるが,これは成木においては根群は浅層に集中的に分布し,若木では比較的深く根群が発達しているためと考えられる。

Table II-1 果実肥大抑制の生じる時点の土壌水分張力 (pF)

a) 果実肥大抑制初期の pF 値

周 期	深 さ	成木 (28年生)			若木 (7年生)		
		10cm	20cm	30cm	10cm	20cm	30cm
I		2.69	2.16	1.83	2.50	2.46	2.39
II		2.70	2.28	1.82	2.67	2.71	2.56
III		2.70	2.26	1.70	2.32	2.45	2.03
IV		—	—	—	2.63	2.70	2.59
平 均		2.7	2.2	1.8	2.5	2.6	2.4

b) 果実肥大抑制の著しい時の pF 値

周 期	深 さ	成木 (28年生)			若木 (7年生)		
		10cm	20cm	30cm	10cm	20cm	30cm
I		2.70	2.44	2.08	2.51	2.71	2.60
II		2.70	2.46	1.99	2.75	2.87	2.70
III		2.70	2.37	1.78	2.53	2.63	2.17
IV		—	—	—	2.55	2.72	2.49
平 均		2.7	2.4	2.0	2.6	2.7	2.5

また、小林・井上⁴⁾のブドウについての実験によると、Fig. II-2のごとく、カンガイ後土壌水分の減少につれて、C.M.E. 付近を境にまず果実肥大の減衰または停止が生じ、ついで新梢伸長の減衰または停止が起ることが示されている。なお、彼らは同様の条件での実験結果から他の果樹作物(イチジク、モモ、ブドウ、カキ、ナシ)についても、水分減少に伴って第一に起るのが果実肥大の減衰または停止、次いで新梢伸長の減衰ま

たは停止、最後に枝葉がシオレてついに枯死するに至る、という結果を得ている。⁵⁾

米国においても、この種の実験研究は非常に多く報告されており、根群域の土壌水分が C.M.E. まで減少すると種々の生理障害、生育障害が生じてくることが結論づけられているようである。⁹⁾

ここに、われわれのいうカンガイ計画上のカンガイ開始時期決定（第 I 章参照）の特徴があるわけである。従来、Briggs と Shantz, Veihmeyer と Hendricks on らが、“植物体は土壌中の水分が F.C. ~ W.P. (シオレ点) の範囲にあれば、これを同じ程度に利用し得る”という説を提示したのは、単に植物体を枯死させないか、あるいは萎凋（イチヨウ）させない程度に保っておく観点からのようであり、土壌水分が水平、垂直方向に迅速に移動することができ、しかも蒸散量が比較的小さい低温下の条件であれば、この説が成立するかも知れない。しかし、わが国におけるように、作物の根群分布は非常に浅く、かつ夏期 7、8 月の蒸散作用が極めて盛んな条件下では、土壌水分毛管上昇移動現象が明確にみられる場合でも、根毛近傍における水分移動速度が減少してくると吸水と蒸散との著しい不均衡状態が容易に生じ、その結果として蒸散量の減衰、果実の肥大停止、新梢伸長停止などの生理、生育障害が生じてくるのである。したがって、作物の正常生育あるいは増産を目的とするカンガイにおいては、主根群の分布する土層の水分を常に C.M.E. (pF 2.7 ~ 3.0) 以上に保つことを原則としなければならない。

3 増収効果および品質について

和歌山県下各地のミカン園カンガイ事業地区の中で、カンガイ園と無カンガイ園の収量、果径階級構成、品質（果実の成分分析）などについて、昭和 39 ~ 41 年に和歌山県が行なった調査結果を中心にとりまとめる。^{7,8)}

調査を行なった園の種々の条件、カンガイ回数、降雨量などは Table II-2 に、各園の果径階級構成、成分分析結果、収量比較について Table II-3 に一括してまとめて挙げた。以下に種々問題はあがあるが、全平均値をとって考察を進める。

Table II-2

収量調査ホ場の概況

園番号	所在地区	位置, 方位, 傾斜	品種樹齢	収量調査年 月	調査樹	調査個数	土壌管理	カンガイ	降雨量*
1	有田市 千田東地区	東南面11階段畑	60年	39. 12	10本	—	シキワラ	30mm7回カンガイ スプリンクラー	6月270mm 9月140mm
		東面26階段畑	70	"	"		"	—	7 140 10 100 8 70 11 60
2	那賀郡 粉河町荒見	19山成畑	21	40. 12	10本	—	シキワラ	7.3mm8回カンガイ(1.5mm/day)	6月270mm 9月440mm
		16山成畑	21	"	"		"	ホース —	7 130 10 80 8 5 11 110
3	有田市 宮原町道	24階段畑	成木	40. 12	10本	—	シキワラ	40mm7回カンガイ(6.7mm/day)	6月280mm 9月590mm
		22階段畑	"	"	"		"	(6日間断) スプリンクラー —	7 100 10 80 8 10 11 110
4	那賀郡 那賀町 麻生津西浦	21階段畑	7~12	40. 12	5-10本	1樹当たり全個数	シキワラ	15mm3回カンガイ(4日間断)	** 第2園にほぼ同じ
		21階段畑	7~30	"	"		"	スプリンクラー —	
5	海草郡 下津町丁	23階段畑	30	41. 12	5-10本	1樹当たり200個	シキ草	26.6mm4回カンガイ(6日間断)	
		22階段畑	30	"	"		"	スプリンクラー —	
6	有田市 宮原町道	24階段畑	40	41. 12	5-10本	1樹当たり200個	シキワラ	30mm4回カンガイ(6日間断)	
		24階段畑	40	"	"		"	スプリンクラー —	
7	那賀郡 打田町桜池	28階段畑	成木及び 未成木	41. 12	5-10本	1樹当たり200個	シキワラ	32.3mm3回カンガイ(6日間断)	6月150mm 9月110mm
		28階段畑	"	"	"		"	スプリンクラー —	7 300 8 15

* 和歌山气象台(和歌山市)における既往31年間の降雨量データから, 6~9月の総降雨量について確率計算を行なうと, 昭和39, 40, 41年における生起確率はそれぞれ1/20, 1/1, 1/4である。平年降雨量(6~9月合計)は690mmである。

** 近接地域であるので, ほぼ同様であると推定した。

Table II-3

カンガイ効果調査結果

園番号		果径階級構成(個数)						品質分析						収量	
		L以上	M	S	2S	3S	M以上	果径 指数	果皮歩 合%	果汁比重	クエン 酸	甘味比	糖度	1樹当り収量 kg	カンガイに よる増収%
1	カンガイ	9.0	21.8	39.5	22.9	6.8	30.8	133	25.5	1.053	1.08	11.6	12.4	58.2	+29.3
	無カンガイ	0.8	6.3	26.0	38.1	28.8	7.1	131	26.6	1.061	1.40	9.9	13.9	45.0	
2	カンガイ	11.2	30.6	37.6	17.7	2.9	41.7	134	29.0	1.053	1.228	9.6	12.4	33.8	+33.6
	無カンガイ	0.7	7.0	33.5	40.2	18.6	7.6	139	28.4	1.055	1.369	10.1	13.1	25.3	
3	カンガイ	22.5	39.5	29.2	8.4	0.4	61.9	130	30.5	1.048	1.022	10.9	11.3	—	—
	無カンガイ	3.1	14.9	37.5	26.3	18.2	17.9	135	30.6	1.050	1.066	11.5	12.2	—	
4	カンガイ	5.2	19.8	35.6	30.5	9.5	25.0	125	28.0	1.04	1.03	9.8	10.0	48.1	+22.1
	無カンガイ	1.7	12.3	36.5	38.3	10.9	14.0	125	28.9	1.04	1.04	9.6	9.7	39.4	
5	カンガイ	16.3	43.8	35.2	4.7	0.2	50.9	120	29.5	1.043	1.14	9.1	10.3	(53.9)	+2.6
	無カンガイ	11.2	30.7	36.3	19.7	2.1	41.9	121	28.2	1.043	1.07	9.3	9.9	(52.5)	
6	カンガイ	23.8	30.8	34.0	9.5	2.0	54.6	129	28.8	1.041	1.09	9.4	10.2	—	—
	無カンガイ	7.6	21.5	35.3	26.6	9.1	29.1	130	29.8	1.041	1.03	9.7	9.9	—	
7	カンガイ	11.8	31.7	37.3	16.8	3.2	42.7	126	28.2	1.047	1.13	10.4	11.7	38.4	+17.4
	無カンガイ	8.5	25.7	37.4	22.2	6.2	34.2	126	29.9	1.050	1.34	9.5	12.6	32.7	
全平均	カンガイ	14.1	31.1	35.4	15.8	3.6	45.2	128	28.5	1.046	1.103	10.1	11.2	46.5	+19.2 (+25.4)
	無カンガイ	4.8	16.9	34.7	30.2	13.4	21.7	130	28.9	1.049	1.188	9.9	11.6	39.0	

注) 園番号はTable II-2に対応。

3-1 果径階級構成

効果が明確にあらわれるのは果径階級構成においてである。Table II-3およびFig. II-3から明らかなように、果径の大きい果(L, M)の割合が顕著に増大し、S, 2S, 3Sの果の割合は著しく減少する。M級以上についてはカンガイ園45%, 無カンガイ園22%と明らかに差がみられ、この経済効果は少なく見積っても15%以上になるといわれる。

3-2 品質(果実の成分分析結果)

Table II-3 からわかるように、カンガイ園では無カンガイ園にくらべて糖度、クエン酸含量にも若干低い値を示し、味覚的にすこし‘水っぽい’ということになるが、糖度11以上のミカンは品質としては十分であり、分析結果からみる限りほとんど差がなく、カンガイによる品質低下は考えられないとみてよからう。

3-3 収 量

Table II-3 によると、1樹当り収量で3~34%増、平均では約19%増(第5園の極端に低い値を除くと25%)であった。したがって、昭和39~41年の各地区全体の平均として、カンガイの経済効果は29~38%増であった。

収量を中心とするカンガイ効果の判定は一見簡単のように思われるが、実際にはなかなか困難な問題を含んでいる。第一に同一条件のカンガイ園と無カンガイ園とを選択することが事実上不可能であり、たとえ同一の地形、土壌、品種、栽培条件(管理)を選んでも、自然落果や摘果による環境順応、生育に応じた施肥管理などが行なわれ、また樹体の生長そのものの差異があるため、1樹当りまたは単位樹冠体積の収量比較も厳密には無意味である。第二にカンガイ期有効雨量の年々の多寡に応じてカンガイ効果に著しい年変動があるから、同一園での長年にわたる調査が必要であること。第三に非カンガイ期である10, 11月の土壌水分状態は着色や品質、果実肥大に大きな影響を及ぼすが、この期間の影響をいかに評価するかなどである。したがって、以上には3年にわたる調査結果をまとめてすべて平均値をもって考察し、カンガイ効果の傾向ともいふべき概略を述べるにとどめた。

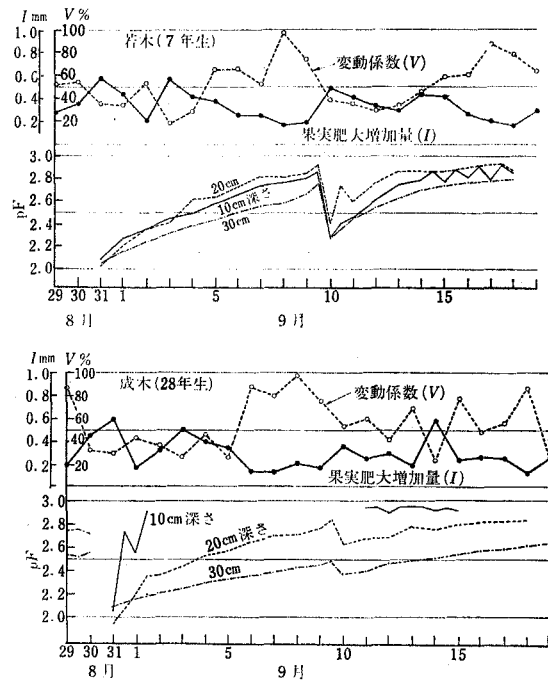


Fig. II-1 果実肥大増加量と土壌水分の関係 (粉河)

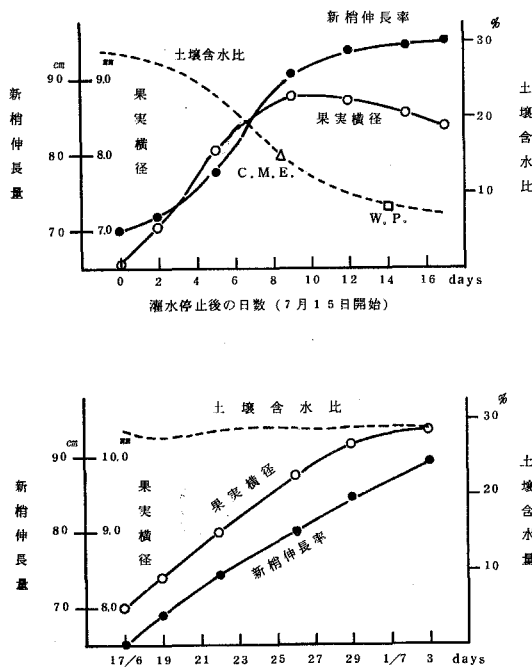


Fig. II-2
土壌水分の減少に伴うブドウの新梢伸長
および果実肥大 (小林, 井上による)

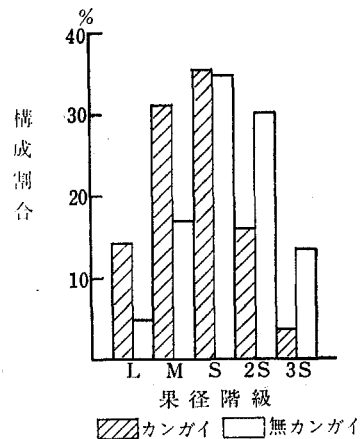


Fig. II-3 果径階級構成

(和歌山県下)

Ⅲ 散水の浸入，浸入後の土壌水分拡散移動 について

1 ま え が き

畑地カンガイ計画の調査項目の一つとして散水カンガイの場合でも従来インタークレート調査が必須のものとしてとり入れられて、シリンダー・インタークレートが実測されてきている。しかし、この測定結果がカンガイ計画樹立の過程で有効に利用されたことがあるだろうか。浸入強度はむしろ雨滴の衝撃の強さと共に主として土壌管理の方法（有機質肥料の施用量，シキ草，シキワラ，草生，中耕，踏み固めの程度の差など）によってほとんど規制されるようである。しかも重要なのは単なる浸入強度ではなく，散水浸入のプロフィールなのではなからうか。

Spraying

次に散水カンガイでは，散水量分布の状態が散水配分効率（ E_p ）¹⁾として，直接カンガイの効率に影響する。 E_p は $E_p = (h_{\min} / h_{\text{mean}}) \times 100$ %（ただし， h_{\min} は受水カンによる散水量観測値のうち，少ない方から 2.5%までの値の平均値）と定義される。この E_p の定義を樹園地の樹上散水カンガイに適用すると，樹下における散水量分布の乱れは著しいから， $E_p = 60 \sim 70$ % ぐらいの低い値となるようである。実際的には地表の散水量分布ではなく，土壌水分量分布によって配分効率を考えるべきではなからうか。

以上のような認識のもとに筆者は散水のプロフィール，浸入後の散水拡散による土壌水分均一化およびホ場での配分率を考えるときの単位の面積の大きさなどについて実験的に検討を行なった。

浸入，土壌水分拡散移動の問題は従来より土壌物理学分野，不飽和浸透研究分野でとりあつかわれ，多くの理論的研究がなされてきた。理論発展の過程についての検討は，本論文の主旨から離れるので，避けて，具体的に散水浸入後土壌水分拡散移動に直接関係する若干の研究成果をあとがえてみる。

浸入問題については，1943年 Bodman と Colman²⁾ が古典的な実験によってタン水浸入過程の機構を定性的に明らかにした。1956～9年 Philip^{3,4)} が拡散方程式を拡散係数 D 一定の仮定のもとに解いて一般的な浸入パターンを例示して，タン水浸入

と散水浸入の差異などを論じたのをはじめとしてYoung⁵⁾も同様な手法で、RubinとSteinhardtら^{6,7)}は砂土についてタン水、散水浸入の差異に関して理論的実験的に考察し、浸入過程の理論的解明を行なった。また、Gardnerら⁸⁾は浸潤先端部の急激な土壌水分変化を γ 線水分計によってとらえている。

土壌中における水分勾配ないし水分張力勾配による水分移動については、前述の拡散型方程式を用いて、 D 一定の条件で解を得たYoung⁹⁾の研究がある。土壌中の水の運動についてde VriesとPhilipら^{10,11)}の示した包括的な運動方程式を發展させて、蒸気体の水の移動、熱勾配を考慮した水の移動に関する研究も進展しつつあり、また D に水分変化による値の変化 (concentration dependent of D) を与えて非線型拡散方程式を解く手法についても著しい発展をみた。¹²⁾

しかし、これらの研究について一般に言えることは、非線型拡散型方程式の解法に重点が置かれている結果、拡散係数 D に関する考察ならびに土壌中の種々の条件の不均一性に関する評価は等閑視されているくらいがあつて、ホ場状態における土壌中の水分移動を具体的に扱い得るまでに至っていないように見受けられる。

筆者はホ場において、散水浸入、水分拡散移動の現象を実験的にとらえ、それらの結果をカンガイ計画へいかに応用してゆくかという視点に立って本章を構成した。

2 散水の浸入

2-1 散水の浸入プロファイルについて

(1) 測定方法

第1章で述べた試験ホ場のうち、粉河において、ガラスブロックを5, 15, 25, 35, 45, 55 cmの各深さに埋設しているのを利用し、スプリンクラー散水、自然降雨、およびホースによるカンガイの浸入プロファイルを自記記録計によって追跡した。測点部位はFigs. 1-3 (2)において G_3 および G_4 の点である。本自記記録計を用いれば、土壌水分値の計測は各深さにつき2分間隔で行なうことができる。なお、ガラスブロックは測定の時間遅れ (response time lag) のもっとも小さい水分計の一つである。¹³⁾

(2) 結果および考察

横軸に土壌水分 ($\theta w\%$), 縦軸に深さ ($D\text{ cm}$) をとり, 時間 (t 分) をパラメータとして侵入のプロフィールを描くと Figs. II-1 のようになる。

まず①はホースによる散水で, 散水量 40 mm , 散水強度は不均一で非常に大きく (約 $40\text{ mm}/8\text{ min}$), タン水が生じた場合の侵入プロフィールである。侵入強度の経時変化は, 散水強度の不均一なことにもよるが, 降雨の侵入状態 (②, ③) に比べてかなり乱れた様相を呈しており, とくに $t=10\text{ min}$ から 15 min の間に急速に深く浸入しているのは根の腐食跡か, キレツかあるいは土壌小動物のうがった大間ゲキを通しての水の浸入によるものとみられる。事実, ホ場ではこの種の大間ゲキがいたるところに分布していることは試溝により容易に確かめられた。散水は約8分で終了したのであるが, 終了後も浸潤前線は下降をつづけ (タン水があるので), $t=75\text{ min}$ 後もなお地上部の散水量不均一に基づいて土壌水分の横方向移動による土壌水分増加が顕著にあらわれているようである*。

②と③は共に自然降雨の侵入状態を追跡したものである。タン水条件下における侵入プロフィールと著しく異なる点は saturate zone を形成することなく, 全層にわたってほぼ F.C. の状態を保ちつつ浸潤前線が降下してゆくことである。侵入強度の減衰は非常に緩慢であり, 侵入過程が終了するまでほぼ初期侵入強度に近い値を保ち, この程度の降雨強度と降雨量では全くタン水を生ずることなく, 全層にわたってすみやかに均一な土壌水分値 (F.C. に近い) に達した。

なお, ③の $t=70\text{ min}$ 以後 (降雨量は $0\sim70\text{ min}$ の間に 17.1 mm , 降雨強度 14.6 mm/hr で $70\sim110\text{ min}$ の間に 2 mm の降雨) の土壌水分変化は地上部の降雨量分布の不均一 (枝葉シヤ断による降雨量分布の乱れによる。後述) に基づく土壌水分の横方向拡散移動によるものと考えられる。

タン水を生ぜしめないような低い強度の自然降雨またはスプリンクラー散水の侵入は, タン水条件下のそれと比較して, 土壌構造の局所的な不均一性の影響——例えばキレツ, 土壌小動物のうがった大間ゲキ, 根群腐食跡の間ゲキなど——を受けることが少ないわけ

* 測点の直上に降った降雨の侵入は $t=75\sim165$ 分の間で一応完了しているが, それ以後側方からの水分移動によって深さ 40 cm 以深の土壌水分が増加している。このことは, (a)-(b) = -2.6% であるけれども, $t=165$ 分の時点においては (a)-(b) $\div 0$ であり, しかも $t=165$ 分以後は 40 cm 以深のみの土壌水分増加が生じたことから推定したものである。

で、これらの実測による浸入プロフィールをみても、Rubin と Steinhardt,^{6,7)} Philip^{3,4)} らによる理論解、実験結果と比較的よく一致しており、不飽和土壌水分の運動を記述するとみなされる拡散方程式に基づく解析の手段も有力であると考えられる。

2-2 浸入強度について

散水カンガイではしかし、許容散水強度の一応の目安を知っておく必要がある。そこで以下のような簡便な方法を用いて散水のベシック・インテークレート（許容散水強度に相当）を測定した。すなわち、直線上に中圧スプリンクラー（レインバード No. 30）3本を近接して設置して、散水強度が場所によって0～40 mm/hr の範囲でバラつくように故意に散布図型を乱し、任意の地点において散水量を観測しつつ、目視により各地点の湿潤飽和点、タン水の生ずる時点、流去開始点に達する時間を記録していった。そして散水開始1～2時間後にタン水の生ずる直前の状態に至らしめるような散水強度をもって許容散水強度（ r_b ）と判定した。¹⁴⁾

この実験によると、 r_b 平均値は壤土の場合では12～15 mm/hr、植装土で8～12 mm/hr の間に入ることがわかった。ところで、ここで注目すべきは、 r_b の値は観測地点によって大いにバラつき、各観測点の局所的な土壌の状態——例えば踏み固められた状態、シキワラをしていた状態、そうでない状態など——によってほとんど規制されているのではないかということであった。そこで次に土壌管理の異なる傾斜ホ場で散水中の地表流去量を測定した。

2-3 地表流去について

土壌管理方法の異なる傾斜園——粉河試験ホ場の一部、ただし柿園と切畑試験ホ場の一部のミカン園——でスプリンクラー4本矩形配列の散水試験を行ない、配列の下端辺上の一部において集水トイを3 cm深さに設けてトイ集水量を測定し、簡便ながら地表流去量を求める一つの目安とした。

ホ場条件、土壌管理の方法などと共に結果をTable II-1に挙げた。これによるとホ場条件、その他散水条件^{*}に大きな差異がないにもかかわらず、流去量は切畑（1）地

* 散水条件 散水強度 7.6 mm/hr は SS.30-F2 中圧スプリンクラー

散水強度 13.2, 13.5 mm/hr は SS.60F 高圧スプリンクラーによる。

散水条件が異なるにもかかわらず、切畑(1)、切畑(2)では流去率0.6、0.5%と差が出ていない。

区で0.6%，粉河地区で7.0%と開きが生じている。前者では厚くシキワラを施していて表土がとくに膨軟な状態であり，後者ではイタリアンライグラスの草生栽培を行なっているが，われわれが散水試験区として数回にわたって使用しているのでいくぶん踏み固められていると思われる場所である。

これらの初歩的なデータのみからは多くを言うことができないが，許容散水強度は土壌管理の良否に大きく影響されることが考えられる。

Table III-1 地表流去率測定結果

測定場所			切畑 (1)*	切畑 (2)*	粉河**
地表流去率 %			0.6	0.5	7.0
ホ場・土壌条件	傾斜度		25~28°	25~28°	18~22°
	ホ場状態		シキワラ	シキワラ	草生
	土性		L	L	L
	仮比重		1.2	1.2	1.3
	腐植含量		表土富む	表土富む	含む
散水条件	散水量 mm		18.0	10.1	25.8
	先行散水量 mm		16	8	20
	散水強度 mm/hr		13.2	7.6	13.5
	測定時土壌水分 %		ほぼ F.C.	ほぼ F.C.	ほぼ F.C.

* ミカン園

** 柿園

散水カンガイにおいて，ある与えられた条件の組み合わせによってカンガイ効率を決定するのではなくて，逆にカンガイ効率を高めるということを第一義として種々の条件を選定し組み合わせるという積極的な姿勢が正しいものとする，まず散水効率 (E_a ，後述) を高めることは大きな意義がある。そして E_a 向上には散水強度を大きくすることが有力な方法の一つであって，またこれにより散水時間を短縮できるという積極的意義もある。とすると，現在果樹園カンガイなどに適用できる中型スプリンクラー（例えばレイノバード $\phi 30$ から $\phi 70$ B 程度まで）を用いると散水強度は 6~15 mm/hr の範囲を越えることはないから，土壌管理によって，傾斜地においても，この程度の浸入強度を

もつ土壌をつくり出すのも場合によっては可能であろう。

3 散水浸入後の土壌水分拡散移動について

散水カンガイの効率に關与する要素として散水効率* (E_a) と散水配分効率 (E_p) が考えられる。後者のあらわし方には種々問題があり、この取り方によって散水カンガイ全体の効率 (カンガイ効率と呼ぶことにする、 E_f) が大きく左右される。とくに果樹に対する樹上散水カンガイの場合には、スプリンクラー配列間隔を適正にしてもなお、散水量分布は枝葉遮断の影響を受けて著しい不均等を生じ、このデータにより E_p を算出すると 60~70% という非常識に低い値となってしまうであろう。そこで、 E_p を考える場合に地表での散水量分布よりも土壌水分分布を基準にとるのが合理的であるから、まず樹冠下の散水量分布を求めた上で、散水の浸入後根群域内でどのように土壌水分が拡散移動して再分布するかを実際のホ場で検討した。

3-1 樹冠下の散水量分布

切畑試験ホ場において、適正と思われる間隔でスプリンクラーを矩形4本配列とし、樹冠下に受水カンをも密にならべて散水量分布を測定したところ Fig. III-2 のような結果を得た。一般的法則性は見出せないが、散水量分布の不均等性が明らかに指摘される。しかし、それは小面積内での (水平的に 30~40 cm 内外の範囲での) バラつき、いわゆる小規模な不均等分布にすぎないことがわかる。そして分布量の均等係数 (C_u) は 70% 前後となる。

またホ場全体としても、10数例の散水試験から得た結果 (Table II-2 受水カンの間隔は 2 m 方眼、ただし散水時間の後半に受水カンをも 1 m 平行移動させて、局所的影響を軽減しようとした) では、同一スプリンクラー、同一配列間隔の条件で、樹園地の C_u は裸地

* 蒸発飛散損失と枝葉遮断付着損失を含む。従来適用効率と呼ばれてきたが、訳語がぴったりしないので散水効率と名づけた。Application efficiency, E_a

のそれに比較して中圧，高圧スプリンクラー共に約15～20%低下して同じく70～75%となった。^{*}

Table Ⅱ-2 裸地と樹園地のCuの比較

	スプリンクラー	散水時間	平均風速	散水強度	Cu
裸地	SS30F2	50 min	0.6 m/sec	7.0 mm/hr	90.8%
	SS60F	30	0.0	12.6	88.8
樹園地	SS30F2	40 min	0.3 m/sec	6.6 mm/hr	74.9%
	SS60F	40	0.0	13.2	70.3

注) いずれの場合も受水カン配置は2m方根，ただし樹園地では散水後半に受水カン
を1mずつ一方向にずらし局所的影響を少なくするようにした。

3-2 散水浸入後の土壌水分拡散移動

(1) 測定方法

平地ミカン園の場合： 前項と同一のホ場において，Fig.Ⅱ-3のようにスプリンクラーを4本矩形配列とし，一つの対角線上に1m間隔で土壌水分測点a～mを設け，各点には深さ20，30cmにガラスブロックを埋設しておいた。そしてカンガイ対象土層全体の平均土壌水分がF.C.に達するに必要な量を散水し，散水後の土壌水分変化を経時的に追跡した。

傾斜地ミカン園の場合： 粉河および遠方試験ホ場において平地の場合と同様の方法（測線は傾斜方向）で試験を行なったが，一方もっと単純化した条件下でも実験を行なった。すなわち，散水域内の樹間部の一部をビニールシートで覆って散水を遮断し，シート下の土壌の水分変化を散水前，散水直後，12hr後，24hr後，48hr後に採土法によって測定した。ただし，散水を完全に遮断する区と散水の後半のみを遮断する区の2通りを設けて比較検討した。

* ちなみに，同一園（切畑）において同一方法で測定した自然降雨の降雨分布の均等係数（Cu）は，平地79.4%，傾斜地75.4%であった。

(2) 結果および考察

平地の場合： Figs. III-4 は各測点の土壌水分の同時刻における値を結んで折線グラフとし、時間経過と共に各測点間の含水比 (θ_w %) の均等係数が高くなってゆく状態をあらわしたものである。カンガイ前の含水比とそれぞれの測点近傍の観測散水量とから計算した24時間計算含水比（土壌水分の降下浸透のみを考え、横方向移動はないものと仮定して計算）に対して散水後24時間実測含水比とを比較すると、後者の均等係数がやや高くなっており、また散水量は近傍の観測値から平均して求めたものであるからバラつきが小さくあらわされていることを考慮すると、この均等化傾向はさらに著しいものと推定される。次に、24時間計算含水比の著しく大きいか、または小さい測点（a, b, d, i, j, l）においては実測含水比の方がF.C.付近に集中しており、表の最下欄の値からわかるように、測線（測点）全体としては根群域内外から水の出入が非常に小さいことから判断すると、土壌水分拡散移動に基づく水分均等化再分布の程度はかなり高いといえるであろう。

(補 遺)

前図Figs. III-4において

散水量R： 土壌水分測点直上で散水量を測定することはできないので、Fig. III-3の格子点上における観測値の近隣のを平均して各測点の散水量とした。したがって、RのCuは87.6%となっているが、実際には前項で述べたように70~73%程度であろう。

なお、全体としての散水量は、まず全測点にわたって散水前含水比 θ_{wi} を測定し、それらのカンガイ対象土層（30cm）内の平均値 θ_{wi} をとり、そして平均的に散水によって対象土層がF.C.に達するに必要な水量を求めて散水時間を調整した。

計算含水比 θ_{wc} ： 測点の散水前含水比 θ_{wi} と、その測点付近に降った散水量Rとから土壌水の横移動および深層浸透損失が全くないと仮定して算定した。

$$R = \frac{\theta_{wc} - \theta_{wi}}{100} \cdot S_a \cdot D$$

S_a ： 仮比重

D： 対象深さ（mm）

より θ_{wc} を得る。

散水中または散水後24hr以内の含水比(細実線)： 本試験では自記記録計を使用しなかったので、迅速な測定はできなかったが、散水後少時にして θ_{wm} に近づくことから、土壌水分移動による均一化はかなり早く完了するものようである。

以上により考察を進めると、

(a) まずFig.Ⅲ-4最下欄の水収支の数値をみると、各測点ではかなり大きな正または負値をとるが、全体としては相殺されて小さな値となるので、測点全体としては著しい深層浸透損失はないものと判断した。(本試験ホ場は心土層35~40cm以深はCL~Cであるから著しい深層浸透は起り得ない)

(b) 前述のように θ_{wc} の著しく大きいまたは小さい測点において θ_{wm} がF.C.付近に集中すること。

(c) θ_{wm} と θ_{wc} の均等係数を比較すると前者の値が数%高い。他の実測例をまとめて、 θ_{wm} の均等係数 C_u を示すと

	深さ15cm	深さ35cm
切畑 平地	95%	94%
" 傾斜地	96	95

と高い値を示す。

(d) Rは前述のような操作によって算出した。

以上により、距離50cm内外の範囲における土壌水分の浸入過程または浸入後の均等化作用は十分に行なわれており、実際的なカンガイ計画上においては、枝葉遮断による散水分布の乱れは考慮する必要がないものと判断した。

なお、他の実測例についても同様の計算を行なって以下に挙げた。(Fig.Ⅲ-4(2),(3),(4)(5),(6))

傾斜地の場合：

a. 散水を完全に遮断した場合

散水を完全に遮断した部分の散水後24時間における含水比(θ_w %)を測定し、等 θ_w 曲線を描いたのがFig.Ⅲ-5である。この結果によると、水分移動は表層部と根群域下層部(20~30cm)とに顕著であって、中間層ではむしろ小さい。この理由は、表層にあっては0~7cm深さの腐植を含みやや黒ずんだ土層とその下の耕土とがかなり判然とした層序をなして接続していて、その境界層部分で水の流動が構造的にも行なわれやすいことと、下層にあっては、初期含水比が比較的高くて capillary conducti-

vityが他の層に比べて大であることが考えられる。なお、完全遮断部分の地表面のヌレの状態を地表面での目視により判定すると、上からみてFig. Ⅱ-6のようであり、表層部分の水分移動の傾向の顕著なることを示している。ただし、これは地表流去が全く認められない場合である。

b. 散水の後半を遮断した場合

Fig. Ⅱ-7にあらわれている表層0～15 cm付近までの水分増加はもちろん散水前半の無遮断時の影響によるものである。(この場合初期含水比はC.M.E.をやや下まわる14%であった。)

Fig. Ⅱ-7によると、散水後24時間、48時間の等 θ_w 曲線は斜面上方からの水分移動の方向および限界を明示している。中間層における移動量が比較的小さいという前述の傾向はほとんどかくされ、移動距離の限界は70 cmを越え、上部境界(ビニールシート上縁)から50～60 cm以内は無遮断時とほぼ同様の水分分布をなしているものとみられる。

ところで実際に遭遇する条件は上述のbの場合で、散水量分布の局所的変動は前述のように(極大部/極小部) = 2/1程度と考えてよく、その変動域のスケールは一般に30～40 cm以内であった。したがって、この観点から上述の結果を検討してみると、散水前含水比C.M.E.前後、散水量25～40 mmとして、カンガイ計画上支障をきたさない程度に土壌水分が均等化される範囲は表層(0～10 cm)で40～80 cm、中間層で30～40 cm、根群域下層部で40～80 cmと考えてよい。なお、一般に根群域より下の心土層は透水係数の比較的小さいclayeyな、緻密な土壌よりなる場合が多く見られ、傾斜地においてはとくに心土層の上側に沿って水分が流動しやすいものと考えられる。

したがって、3-1項で述べた樹冠の枝葉遮断による散水量分布の乱れは實際上全く考慮する必要がないといってよからう。さらに、平地、傾斜地共に少なくとも本実験を行なった土層配列条件下では、裸地単一スプリンクラー散水試験結果が得られれば、図上計算で適正な配列間隔を決定し、その配列および散水配分効率の値をそのまま樹園地に適用することができると思われる。

次に、以上と関連して散水配分効率についてさらに若干検討する。

4 散水配分効率 (Spraying Pattern Efficiency, E_p)

について

従来の定義によれば

$$E_p = (h_{\min} / h_{\text{mean}}) \times 100\%$$

h_{\min} : 最小散水深

h_{mean} : 平均散水深

である。¹⁾この式は土壌水分の鉛直下方方向の移動のみを考慮して、最小散水深（ただし、観測散水深のうち小さい方から25%の数の観測値の平均値をとる）を必要カンガイ土層の下端に達せしむるという最も厳密な考え方から導かれてきたものである。したがって、本章で述べた土壌水分の移動特性ならびにI章で述べた土壌水分消費の水平部位による大きな差異を考慮すると、ややゆるい条件で E_p を定義するのがむしろ合理的のように思われる。

そこで筆者は以下の式で E_p を定義して果樹園カンガイに適用してゆくことを提案する。

$$E_p = \left(1 - \frac{W_l}{R_e}\right) \times 100\%$$

$$= \left[1 - \frac{\sum \{(h - h_{\text{mean}}) \times a\}}{R_e}\right] \times 100\%$$

h : 平均散水深を越える散水深観測値

h_{mean} : 平均散水深

a : 観測格子の面積

R_e : 地上到達散水量

本式によると、平均散水深を越えた水量のみが深層浸透損失 $W_l = \sum \{(h - h_{\text{mean}}) \times a\}$ となる。なお、従来から散水分布の均等性の指標として用いられている均等係数 C_u で表現すると

$$E_p = \left(100 - \frac{100 - C_u}{2}\right) \%$$

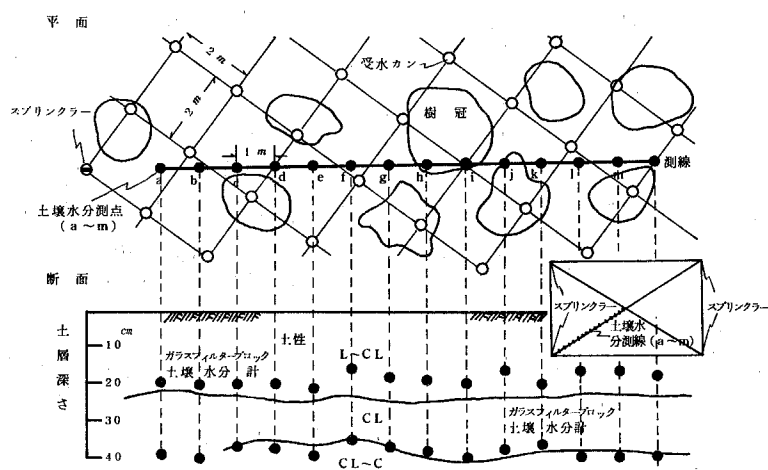
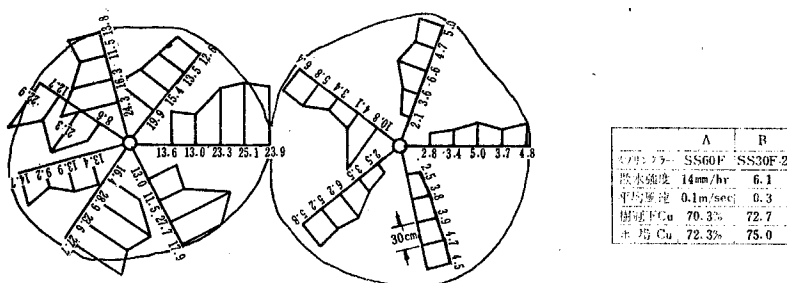
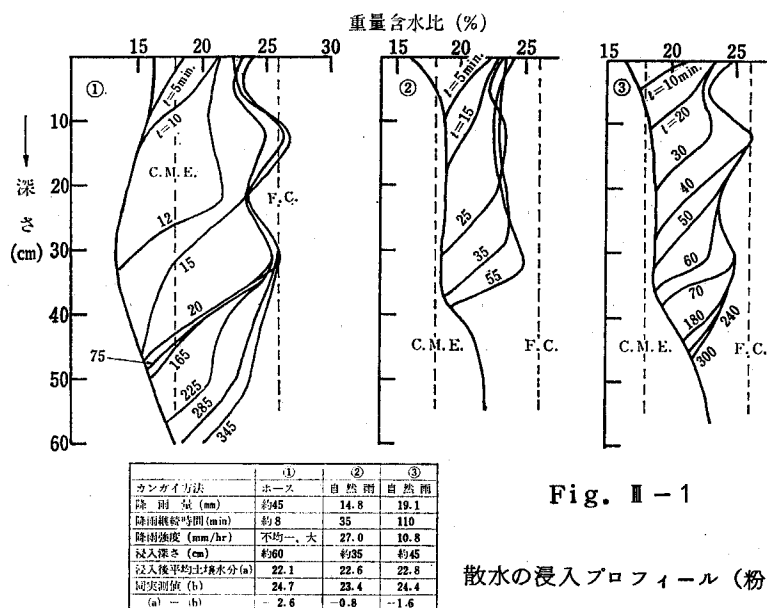
となる。¹⁾

5 総 括

本章において筆者が明らかにし得た事項は次のとおりである。

- (1) 散水の浸入プロファイルにみられる特徴は、タン水条件下の浸入と異なり、saturate zoneを形成することなく、F.C.に近い状態で浸潤前線が降下し、カンガイ土層全体にわたってほぼF.C.の水分分布を保つことである。また散水の浸入は土壌構造の局所的不均一性の影響を受けることが少なく、したがって、拡散型方程式に基づく解析的手段が有力であろう。
- (2) 浸入強度（許容散水強度）は壤土12～15 mm/hr，植壤土8～12 mm/hrが一応の目安となるが、土壌管理の良否によって非常に大きい影響を受ける。したがって、実際的にはカンガイ効率を高めるために散水強度を大きくすることが有利であるので、浸入強度を散水強度以上にするような土壌管理を行なって適応してゆくことも、場合によっては考慮すべきである。
- (3) 樹冠下の散水量分布は枝葉による遮断のために局所的に大きな乱れを生ずる。しかし、この分布の乱れは、散水浸入後の土壌水分拡散移動によりほぼ完全に均等化されることを明らかにした。土壌水分の均等化される範囲は本実験条件下においては、表層で40～80 cm，中間層で30～40 cm，根群域下層で40～80 cmであった。したがって、裸地における散水試験のデータから E_p ，スプリンクラー適正配列などを図上計算で求めて樹園地に適用することができる。
- (4) (3)を考慮して、 E_p を次式で定義すればより実際的でかつ合理的であると考えられる。

$$E_p = \left[1 - \frac{\sum \{ (h - h_{mean}) \times a \}}{R_e} \right] \times 100\%$$



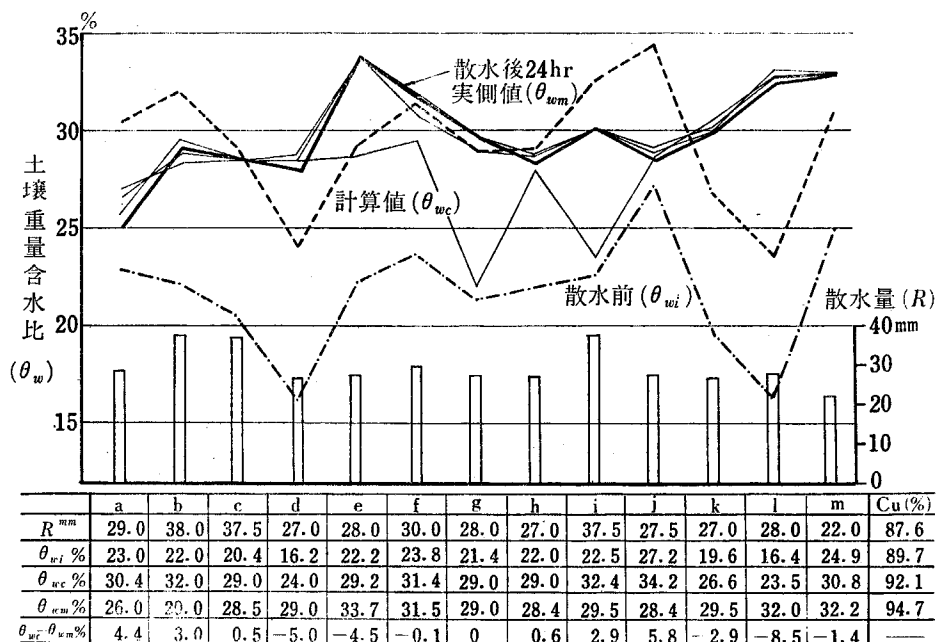
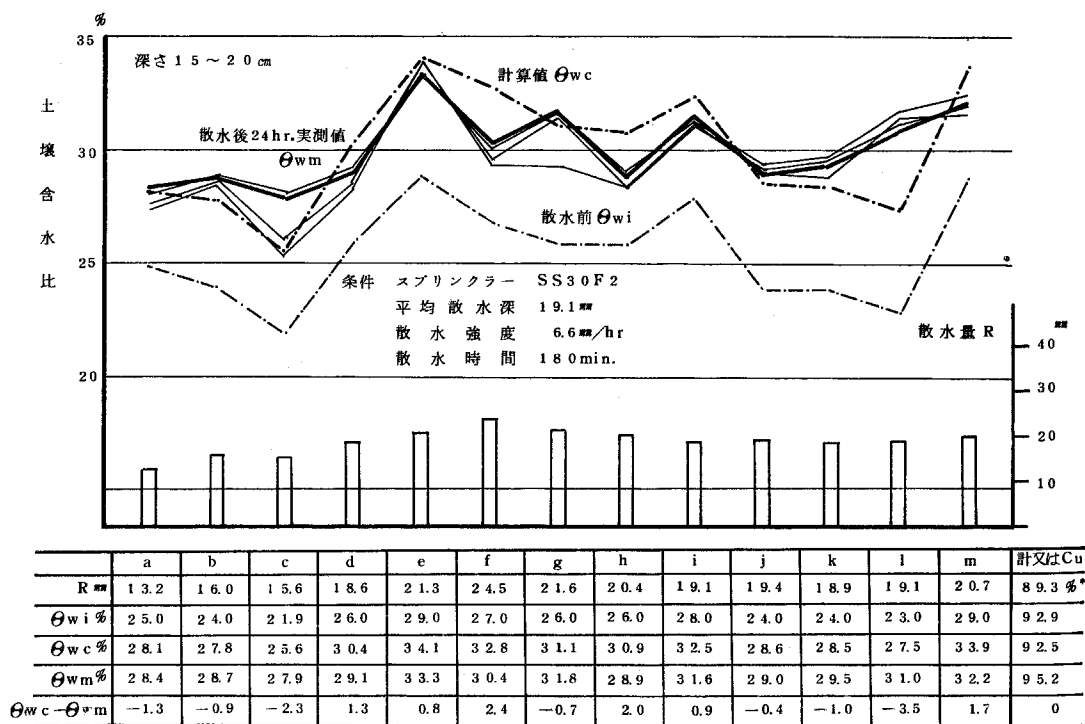


Fig. Ⅲ-4 (1) 散水浸入後の土壌水分拡散移動による均一化
(切畑平地, 深さ15~20cm)



* 本場全体の散水量分布の均等係数 (Cu) は 75.0%

Fig. Ⅲ-4 (2) 散水浸入後の土壌水分拡散移動による均一化
(切畑平地, 深さ15~20cm)

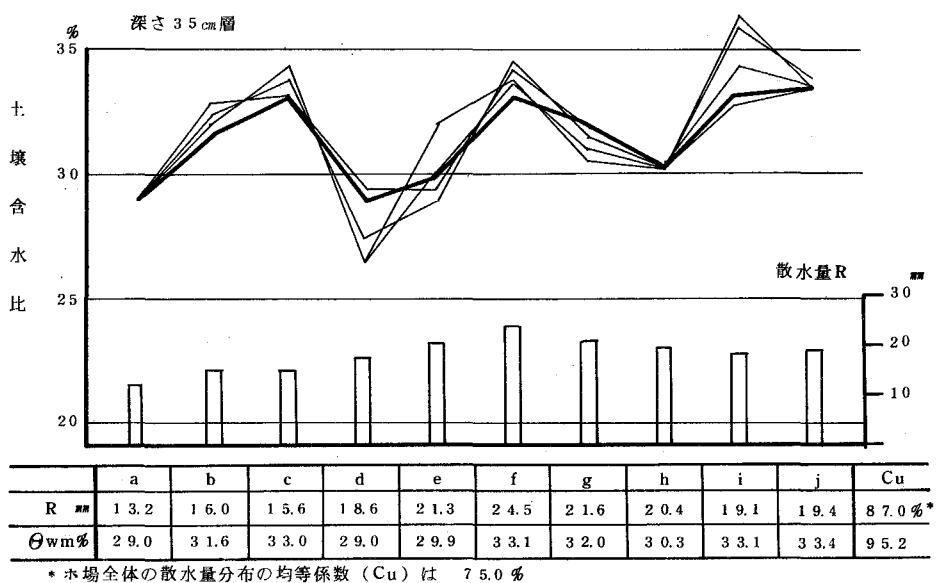
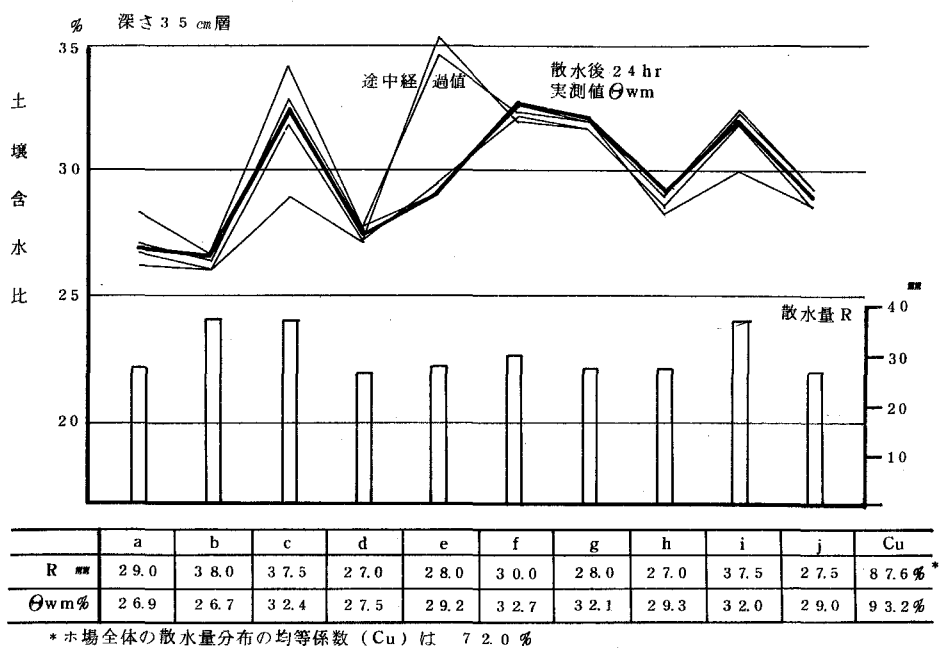


Fig. III-4(3), 4(4) 散水浸入後の土壌水分拡散移動による均一化
(切畑地区, 深さ 3.5 cm 層)

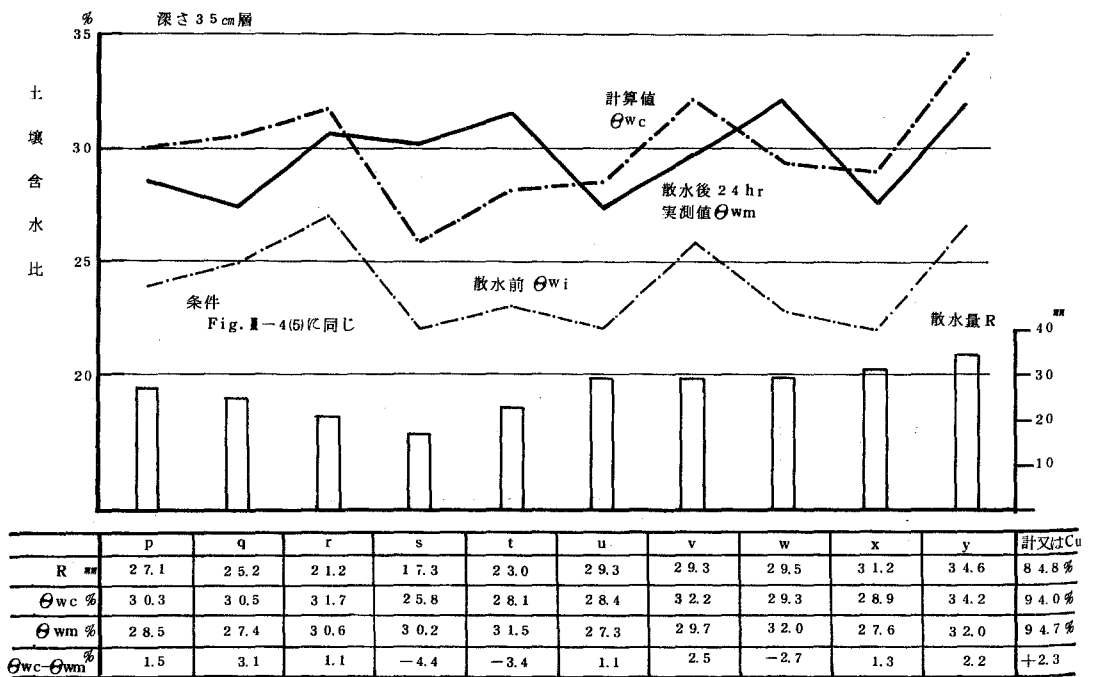
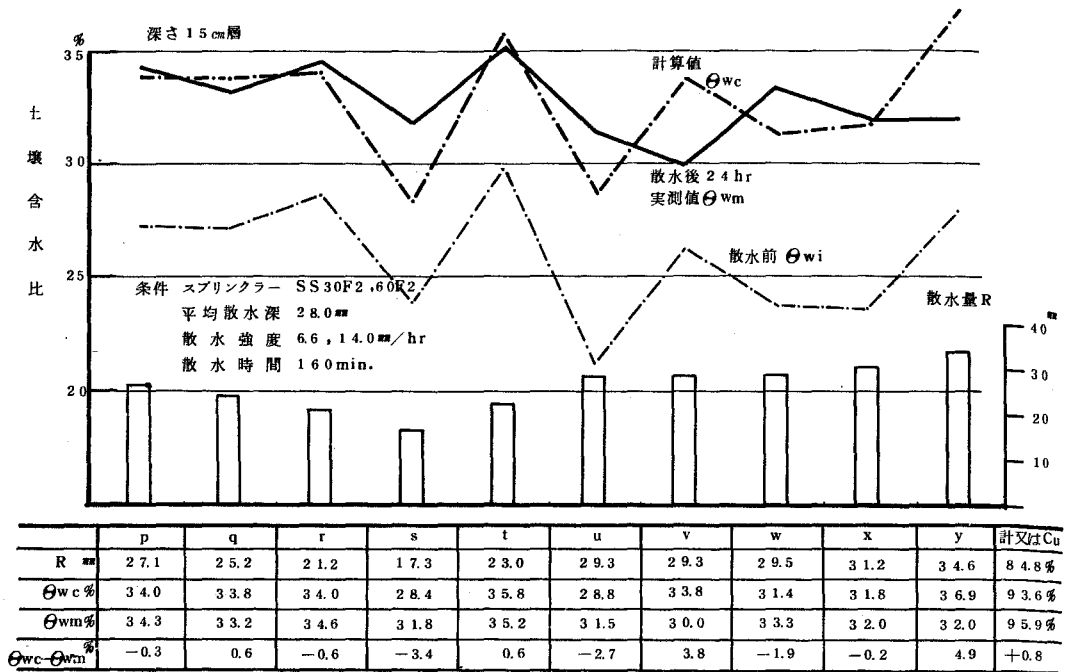


Fig. Ⅱ-4(5), (6) 散水浸入後の土壌水分拡散移動による均一化
(切畑斜面, 深さ 35 cm 層)

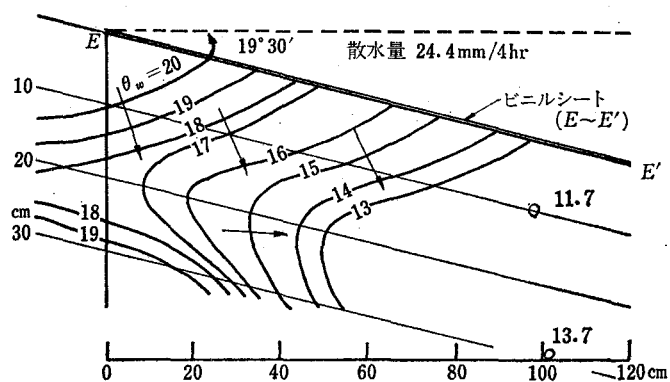


Fig. Ⅲ-5 散水終了後 24 hr における土壌水分分布
(散水完全シャ断区, 粉河傾斜地)

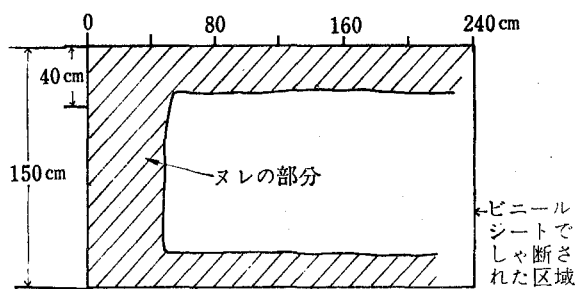
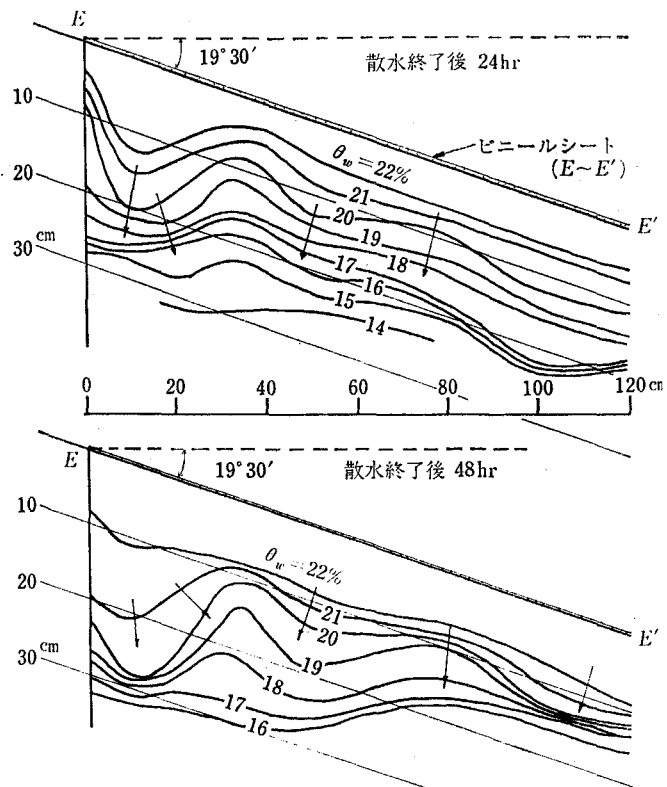


Fig. Ⅲ-6 地表面のヌレの状態
(散水完全シャ断区, 粉河傾斜地)



注)

散水量

無シヤ断域 44mm/4hr

1/2シヤ断域 21mm/2hr

Fig. Ⅱ-7 散水終了後 24hr および 48hr の土壌水分分布
(散水 1/2 シヤ断区, 粉河傾斜地)

Ⅳ 有効雨量についての考察

1 ま え が き

湿潤地帯に属するわが国の畑地カンガイにおいては、自然の降雨を有効に利用するようなカンガイ計画がたてられなければならない。そのような方法の一つとして表層カンガイがある。^{1,2)}

また、有効雨量算定の方法として現在根群域内の1日ごとの水収支を計算する“水の貯金法”(bank account method)がとられている。³⁾ たゞし、bank account methodでは蒸発散量(ET)の項に月別平均値を与えているのであるが、I章で述べたごとく、ETは土壌水分保留量に規制されて一つのカンガイサイクルの中で大きく変動するものであるから、この点を計算式の中において考慮しなければならないと考える。

筆者は日々のET算定にⅡ章5-3(1)の線型回帰式を用い、和歌山市における10年間(5~9月)の日降雨量、日蒸発量のデータを分析して有効雨量の算定を行なった。

2 計 算 方 法

2-1 計算方法

Bank account methodにより日データについて、電子計算機KDC-IIで処理した。たゞし、日蒸発散量(ET)は次式によって求めた。

$$ET = 0.762 E_0 + 3.76 S_M$$

E_0 : 計器蒸発量 (mm)

S_M : 土壌水分保留率

(Ⅱ. 5-3(1) を参照)

2-2 条 件

損失雨量：樹冠遮断等による損失水量を4mmとし、地表流出量を10%とした。

したがって、

$$RNN = 0.90 (RN - 4.0)$$

RN : 日降雨量データ (mm)

RNN: 見かけの日有効雨量 (mm)

とした。

1回カンガイ水量: 1回カンガイ水量を地域の平均値として29.3mmとした場合と、表層カンガイとして19.4mmを与えた場合の2通りとした。

カンガイのタイミング:

a. 土壌水分指標 カンガイ対象土層を30cmとし、その保留有効土壌水分が失われる時点でカンガイを開始する。すなわち、保留有効土壌水分量が0になったとき、またはその日のうちに0または負になる場合は、当日中にカンガイを行なうこととした。ここでいう有効水分とは前述のようにF.C.~C.M.E.の範囲である。

b. 間断日数一定 5, 6, 7, 8, 9月の間断日数を、本地区の平均をとってそれぞれ8, 8, 7, 7, 8日としてカンガイを行なうこととした。

初期土壌水分: 計算開始日5月1日の土壌水分保留量を29.3mm (F.C.), 15.0mm, 0.0mmの三つの場合について計算した。

計算期間: 5月1日~9月30日 (153日間)

昭和11~20年 (和歌山气象台におけるデータを用いた)

3 月平均有効降雨に関する考察

日単位の水収支計算 (bank account method) を10年間にわたって行ない、その結果を月単位に集計し、月降雨量RN, 流去と枝葉付着による損失を考慮した降雨量 $RNN = 0.90 (RN - 4.0)$, 平均日計器蒸発量EOD, 月計器蒸発量EOM, 平均日蒸発散量ETD, 月蒸発散量ETM, 月間平均土壌水分SM (mm・有効水分残留量をmm単位であらわす), 月合計カンガイ水量I, 月有効雨量ARN, 月有効雨量の月降雨量に対する比率 $ARN/RN\%$, $ARN/RNN\%$ について一覧表にしたものをTable IV-1, 2に挙げた。Table 1は土壌水分を指標としてカンガイを行なった場合、Table 2は間断日数を定めてカンガイを行なった場合で、それぞれ1回最大純カンガイ

水量29mmと19mmについて示している。なおカンガイ開始日（5月1日）の土壤水分残留量の大小の影響は5月初、中旬以降は全くあられず、いずれの場合もほとんど同じ結果を得たので、Table 1, 2には、初日の有効残留水15mm（1/2）の場合についての計算結果を挙げている。

次に各年の全期間、そして10年間を通じての平均をとって考察すると次表Table IV-3のようである。これについて、まず全カンガイ期間を通じての平均有効残留水分に注目すると、土壤水分指標カンガイの場合、29mmカンガイ区で19mm、19mmカ

Table IV-3 結果の全平均

	S _M [*] mm		ETD mm		I mm		ARN mm		ARN/RN %	
	29 ^{**}	19 ^{**}	29	19	29	19	29	19	29	19
土壤水分指標(a)	19	16	6.5	6.0	720	630	260	280	39	44
間断日数一定(b)	13	8	5.8	5.3	470	300	280	310	44	47

* 全有効水分量 29mm

** それぞれ29mm、19mmカンガイ区を示す

ンガイ区で16mm残留しているのに対し、間断日数一定カンガイの場合はそれぞれ13mm、8mmと非常に乾燥側に保たれていることがわかる。これは間断日数を若干長めにとりすぎたことに起因し、日データをみると、7、8月には土壤水分がC.M.E.を下廻ってしまった日が多く現われている。したがって、日平均蒸発散量ETDの値は、土壤水分指標カンガイの場合、29mmカンガイ区で6.5mm、19mmカンガイ区で6.0mmに対し、間断日数一定カンガイの場合、それぞれ5.8mm、5.3mmと、カンガイ方法を変えることによりETDに0.7mm/dayの差が生じている。（いずれにしても、ETDの値は若干過大となっているが）

次にカンガイ水量には非常に大きな差が生じており、土壤水分指標カンガイの場合、1回純カンガイ水量29mm区で720mm、19mmカンガイ区で630mmの差がある一方、間断日数一定カンガイの場合はそれぞれ470mm、300mmとなっている。後者の場合のように、間断日数が機械的に守られ、しかも本計算例では残留有効水分が負値となる日がつづくというように、土壤水分が低いレベルに保たれ、その上、カンガイ日には少量（19mm）をカンガイする場合には、カンガイ水量は全体として非常に少なくなっている。

Table IV-1 有効雨量計算結果月別集計表 (土壌水分を指標としてカンガイ)

カンガイ水量 29mm										
年	月	RN	RNN	$\frac{EOD}{EOM}$	$\frac{ETD}{ETM}$	SM	I	ARN	$\frac{ARN}{RN}$	$\frac{ARN}{RNN}$
1937	5	106	65	$\frac{46}{144}$	$\frac{60}{187}$	20	129	54	50	82
	6	140	92	$\frac{43}{128}$	$\frac{58}{173}$	19	112	48	35	52
	7	110	73	$\frac{57}{176}$	$\frac{69}{214}$	20	152	61	56	85
	8	21	6	$\frac{66}{203}$	$\frac{75}{231}$	19	225	6	28	100
	9	138	86	$\frac{40}{117}$	$\frac{54}{162}$	19	99	59	43	69
	Σ	515	322	$\frac{50}{154}$	$\frac{63}{193}$	19	717	228	42	78
1938	5	153	101	$\frac{40}{125}$	$\frac{57}{176}$	21	102	73	48	72
	6	151	90	$\frac{46}{137}$	$\frac{59}{177}$	18	75	82	54	91
	7	205	144	$\frac{50}{153}$	$\frac{63}{196}$	20	157	50	25	35
	8	371	292	$\frac{43}{133}$	$\frac{60}{185}$	21	104	72	20	25
	9	101	68	$\frac{43}{130}$	$\frac{56}{167}$	18	131	55	54	81
	Σ	981	695	$\frac{44}{136}$	$\frac{59}{180}$	20	569	332	40	61
1939	5	63	41	$\frac{49}{151}$	$\frac{61}{189}$	19	156	19	30	47
	6	147	108	$\frac{48}{144}$	$\frac{61}{184}$	20	128	62	42	57
	7	23	4	$\frac{60}{186}$	$\frac{69}{215}$	18	202	4	17	100
	8	36	16	$\frac{66}{205}$	$\frac{74}{230}$	19	236	11	30	65
	9	173	123	$\frac{51}{153}$	$\frac{63}{189}$	18	76	91	52	74
	Σ	442	292	$\frac{55}{168}$	$\frac{66}{201}$	19	798	187	34	69
1940	5	30	12	$\frac{54}{168}$	$\frac{65}{200}$	19	178	12	40	100
	6	401	328	$\frac{53}{158}$	$\frac{67}{201}$	21	148	62	16	19
	7	63	37	$\frac{63}{196}$	$\frac{74}{231}$	20	201	21	32	55
	8	149	96	$\frac{52}{162}$	$\frac{63}{195}$	18	130	73	49	76
	9	44	22	$\frac{46}{137}$	$\frac{58}{174}$	17	134	18	40	79
	Σ	687	495	$\frac{54}{164}$	$\frac{65}{200}$	19	791	186	35	66
1941	5	138	90	$\frac{44}{137}$	$\frac{57}{177}$	19	111	51	37	56
	6	351	269	$\frac{37}{112}$	$\frac{49}{148}$	17	83	71	20	26
	7	126	68	$\frac{43}{134}$	$\frac{53}{163}$	15	81	68	54	100
	8	93	58	$\frac{50}{154}$	$\frac{61}{188}$	19	165	45	48	77
	9	453	361	$\frac{33}{99}$	$\frac{54}{161}$	22	49	112	25	31
	Σ	1,161	846	$\frac{41}{127}$	$\frac{55}{167}$	18	489	347	37	58

カンガイ水量 19mm								
RN	RNN	EOD EOM	ETD ETM	SM	I	ARN	ARN RN	ARN RNN
106	65	46 144	57 176	18	109	62	59	95
140	92	43 128	53 160	16	71	77	55	83
110	73	57 176	64 198	16	128	70	64	97
21	6	66 203	68 212	14	204	6	28	100
138	86	40 117	50 148	15	76	65	47	75
515	322	50 154	58 179	16	588	280	51	90
153	101	40 125	52 162	17	77	77	50	76
151	90	46 137	56 169	16	80	76	50	84
205	144	50 153	60 185	17	138	50	25	35
371	292	43 133	55 169	17	81	83	22	29
101	68	43 130	52 157	15	98	62	61	91
981	695	44 136	55 168	16	474	348	42	63
63	41	49 151	56 172	15	128	33	52	81
147	108	48 144	58 173	17	108	67	46	62
23	4	60 186	63 197	14	190	4	17	100
36	16	66 205	69 215	15	198	16	46	100
173	123	51 153	59 177	16	86	91	53	74
442	292	55 168	61 187	15	710	211	43	83
30	12	54 168	60 186	15	155	12	40	100
401	328	53 158	62 187	18	136	69	17	21
63	37	63 196	67 209	14	156	35	56	94
149	96	52 162	59 182	15	126	73	49	77
44	22	46 187	54 161	14	136	14	33	64
687	495	54 164	60 185	15	709	203	39	71
138	90	44 137	53 164	15	83	65	48	73
351	269	37 112	48 145	16	69	83	24	31
126	68	43 134	52 161	15	82	68	54	100
93	58	50 154	58 178	15	126	48	52	82
453	361	33 99	50 151	21	51	124	27	34
1,161	846	41 127	52 160	16	411	388	41	64

カンガイ水量 29mm										
年	月	RN	RNN	$\frac{EOD}{EOM}$	$\frac{ETD}{ETM}$	SM	I	ARN	$\frac{ARN}{RN}$	$\frac{ARN}{RNN}$
1942	5	78 97	78 59	$\frac{46}{142}$	$\frac{5.9}{182}$	19	78 120	78 47	$\frac{49}{49}$	$\frac{80}{80}$
	6	204	141	$\frac{35}{106}$	$\frac{5.5}{164}$	21	52	106	52	75
	7	54	39	$\frac{7.7}{239}$	$\frac{8.4}{259}$	20	250	29	53	73
	8	120	85	$\frac{7.6}{236}$	$\frac{8.4}{259}$	20	227	33	27	38
	9	250	196	$\frac{50}{149}$	$\frac{6.2}{185}$	18	136	38	15	19
	Σ	725	520	$\frac{5.7}{174}$	$\frac{6.7}{210}$	20	785	252	39	57
1943	5	122	85	$\frac{5.1}{158}$	$\frac{6.3}{196}$	19	124	59	48	69
	6	221	168	$\frac{4.3}{129}$	$\frac{6.0}{181}$	22	127	66	30	39
	7	432	352	$\frac{5.0}{155}$	$\frac{6.6}{204}$	21	132	64	15	18
	8	60	32	$\frac{6.9}{213}$	$\frac{7.8}{240}$	20	215	32	54	100
	9	31	10	$\frac{5.9}{177}$	$\frac{6.9}{208}$	19	179	10	31	100
	Σ	866	647	$\frac{5.4}{166}$	$\frac{6.7}{206}$	20	777	231	36	65
1944	5	112	68	$\frac{4.5}{140}$	$\frac{5.7}{177}$	18	104	51	46	76
	6	54	32	$\frac{5.8}{173}$	$\frac{6.9}{207}$	20	195	32	59	100
	7	50	27	$\frac{6.8}{210}$	$\frac{7.8}{240}$	20	222	18	36	67
	8	78	54	$\frac{6.9}{215}$	$\frac{7.8}{242}$	19	205	18	23	34
	9	131	88	$\frac{5.1}{153}$	$\frac{6.4}{192}$	20	129	65	50	74
	Σ	425	269	$\frac{5.8}{178}$	$\frac{6.9}{212}$	19	855	184	43	70
1945	5	116	61	$\frac{4.6}{143}$	$\frac{5.5}{181}$	19	129	51	44	83
	6	107	65	$\frac{5.1}{154}$	$\frac{6.5}{196}$	20	126	58	54	89
	7	220	154	$\frac{6.3}{195}$	$\frac{7.4}{228}$	20	126	114	52	74
	8	69	47	$\frac{8.2}{254}$	$\frac{9.1}{282}$	22	248	34	49	72
	9	223	150	$\frac{4.9}{148}$	$\frac{6.3}{188}$	19	75	94	42	63
	Σ	735	477	$\frac{5.8}{179}$	$\frac{7.0}{215}$	20	704	351	48	76

注) RN : 降雨量 (mm)

RNN = 0.9 (RN - 4.0) mm

ARN : 有効雨量 (mm)

EOD/EOM : 上段 日計器蒸発量 /

ETD/ETM : 上段 日蒸発散量 /

カンガイ水量 19mm								
RN	RNN	EOD EOM	ETD ETM	SM	I	ARN	ARN RN	ARN RNN
77	77	46	55	%	77	77	%	%
97	59	142	172	16	108	47	49	80
204	141	35	52	19	34	115	57	82
54	39	77	78	16	224	29	53	73
120	85	239	242	15	197	52	43	61
250	196	76	77	15	116	40	16	20
725	520	236	239	16	679	283	44	63
122	85	50	58	17	118	49	40	58
221	168	57	64	19	89	84	38	50
432	352	174	197	19	114	78	18	22
60	32	60	62	15	197	32	54	100
31	10	69	72	14	178	10	31	100
866	647	213	223	17	696	253	36	66
112	68	59	63	16	111	46	42	69
54	32	177	188	15	157	32	59	100
50	27	54	63	15	186	27	54	100
78	54	166	192	15	204	26	33	48
131	88	45	54	15	91	70	53	80
425	269	140	168	15	749	201	48	79
116	61	58	69	15	109	41	35	66
107	65	68	71	13	99	65	61	100
220	154	71	72	17	107	120	54	78
69	47	190	220	17	221	46	67	99
223	150	210	222	17	69	95	43	63
735	477	215	227	16	605	367	52	81
		51	56					
		63	69					
		82	84					
		49	60					
		58	65					

下段 月計器蒸発量 (mm) SM: 土壤含水比 (%) 月平均

下段 月蒸発散量 (mm) I : カンガイ水量

Table IV-2 有効雨量計算結果月別集計表 (間断日数を一定としたカンガイ)

カンガイ水量 29mm										
年	月	RN	RNN	$\frac{EOD}{EOM}$	$\frac{ETD}{ETM}$	SM	I	ARN	$\frac{ARN}{RN}$	$\frac{ARN}{RNN}$
1937	5	106	65	$\frac{46}{144}$	$\frac{54}{167}$	15	80	57	54	87
	6	140	92	$\frac{43}{128}$	$\frac{55}{164}$	17	80	61	44	66
	7	110	73	$\frac{57}{176}$	$\frac{64}{198}$	16	113	69	63	96
	8	21	6	$\frac{66}{203}$	$\frac{64}{199}$	8	117	6	28	100
	9	138	86	$\frac{40}{117}$	$\frac{50}{150}$	15	90	57	41	66
	Σ	515	322	$\frac{50}{154}$	$\frac{57}{176}$	14	480	250	46	83
1938	5	153	101	$\frac{40}{125}$	$\frac{52}{160}$	16	72	60	39	59
	6	151	90	$\frac{46}{137}$	$\frac{56}{169}$	16	92	77	51	86
	7	205	144	$\frac{50}{153}$	$\frac{57}{176}$	14	113	46	23	32
	8	371	292	$\frac{43}{133}$	$\frac{56}{175}$	18	83	68	18	23
	9	101	68	$\frac{43}{130}$	$\frac{48}{143}$	11	78	68	67	100
	Σ	981	695	$\frac{44}{136}$	$\frac{54}{165}$	15	438	319	40	60
1939	5	63	41	$\frac{49}{151}$	$\frac{54}{167}$	12	90	27	42	65
	6	147	108	$\frac{48}{144}$	$\frac{54}{162}$	14	80	84	57	78
	7	23	4	$\frac{60}{186}$	$\frac{60}{187}$	10	141	4	17	100
	8	36	16	$\frac{66}{205}$	$\frac{67}{206}$	10	117	16	46	100
	9	173	123	$\frac{51}{153}$	$\frac{59}{176}$	15	84	85	49	69
	Σ	442	292	$\frac{55}{168}$	$\frac{59}{180}$	12	512	216	42	82
1940	5	30	12	$\frac{54}{168}$	$\frac{55}{170}$	9	91	12	40	100
	6	401	328	$\frac{53}{158}$	$\frac{56}{167}$	11	68	104	26	32
	7	63	37	$\frac{63}{196}$	$\frac{66}{203}$	12	126	37	59	100
	8	149	96	$\frac{52}{162}$	$\frac{60}{187}$	15	106	60	40	62
	9	44	22	$\frac{46}{137}$	$\frac{51}{153}$	12	106	22	51	100
	Σ	687	495	$\frac{54}{164}$	$\frac{58}{176}$	12	497	235	43	79
1941	5	138	90	$\frac{44}{137}$	$\frac{53}{164}$	15	64	64	46	71
	6	351	269	$\frac{37}{112}$	$\frac{52}{157}$	19	76	93	26	34
	7	126	68	$\frac{43}{134}$	$\frac{56}{174}$	19	115	68	54	100
	8	93	58	$\frac{50}{154}$	$\frac{55}{172}$	13	96	40	44	69
	9	453	361	$\frac{33}{99}$	$\frac{52}{154}$	21	46	117	26	32
	Σ	1,161	846	$\frac{41}{37}$	$\frac{54}{164}$	17	397	382	39	61

カンガイ水量 19mm								
RN	RNN	EOD EOM	ETD ETM	SM	I	ARN	ARN RN	ARN RNN
mm 106	mm 65	46 144	4.9 153	% 10	mm 58	mm 63	% 59	% 96
140	92	43 128	4.9 146	11	45	74	53	80
110	73	57 176	5.8 179	10	69	73	66	100
21	6	6.6 203	5.8 178	1	78	6	28	100
138	86	3.9 117	4.6 137	11	51	74	54	86
515	322	5.0 154	5.2 159	9	296	290	52	93
153	101	4.4 125	4.8 149	12	40	71	47	70
151	90	4.6 137	5.0 149	10	54	87	57	96
205	144	5.0 153	5.2 160	9	73	50	25	35
371	292	4.3 133	4.9 153	12	51	78	21	27
101	68	4.3 130	4.1 125	5	49	68	67	100
981	695	4.5 136	4.8 147	10	267	354	43	66
63	41	4.9 151	4.9 153	8	58	33	52	81
147	108	4.8 144	4.7 142	7	49	91	62	84
23	4	6.0 186	5.5 169	4	91	4	17	100
36	16	6.6 205	6.0 185	3	78	16	46	100
173	123	5.1 153	5.4 162	10	49	96	56	79
442	292	5.5 168	5.3 162	6	325	240	47	89
30	12	5.4 168	5.0 155	3	58	12	40	100
401	328	5.3 158	5.1 153	6	39	115	29	35
63	37	6.3 196	6.0 185	5	81	37	59	100
149	96	5.2 162	5.3 163	9	70	67	45	70
44	22	4.6 137	4.5 136	6	70	22	51	100
687	495	5.4 164	5.2 158	6	318	253	45	81
138	90	4.4 137	4.8 149	10	36	69	50	76
351	269	3.7 112	4.9 147	16	49	110	31	41
126	68	4.3 134	4.9 151	12	80	68	54	100
93	58	5.0 154	4.9 153	7	62	49	53	84
453	361	3.3 99	4.8 144	18	26	128	28	35
1,161	846	4.1 127	4.9 149	13	253	424	43	67

カンガイ水量 29mm										
年	月	RN	RNN	$\frac{EOD}{EOM}$	$\frac{ETD}{ETM}$	SM	I	ARN	$\frac{ARN}{RN}$	$\frac{ARN}{RNN}$
1942	5	97	59	$\frac{46}{142}$	$\frac{54}{168}$	15	78	40	42	68
	6	204	141	$\frac{35}{106}$	$\frac{54}{160}$	21	48	112	55	80
	7	54	39	$\frac{77}{239}$	$\frac{71}{221}$	7	124	29	53	73
	8	120	85	$\frac{76}{236}$	$\frac{71}{219}$	6	103	56	46	65
	9	250	196	$\frac{50}{149}$	$\frac{55}{166}$	13	88	49	20	25
	Σ	725	520	$\frac{57}{174}$	$\frac{61}{187}$	12	441	286	43	62
1943	5	122	85	$\frac{53}{158}$	$\frac{54}{108}$	11	49	82	67	97
	6	221	168	$\frac{43}{129}$	$\frac{55}{166}$	17	59	86	39	51
	7	432	352	$\frac{50}{155}$	$\frac{60}{185}$	17	111	76	18	22
	8	60	32	$\frac{69}{213}$	$\frac{69}{213}$	11	116	32	54	100
	9	31	10	$\frac{59}{177}$	$\frac{50}{168}$	6	117	10	31	100
	Σ	866	647	$\frac{54}{166}$	$\frac{58}{180}$	12	452	286	42	74
1944	5	112	68	$\frac{45}{140}$	$\frac{54}{169}$	15	90	38	34	56
	6	54	32	$\frac{58}{173}$	$\frac{59}{178}$	11	117	25	47	79
	7	50	27	$\frac{68}{210}$	$\frac{64}{199}$	9	146	27	54	100
	8	78	54	$\frac{69}{215}$	$\frac{67}{208}$	8	89	54	69	100
	9	131	88	$\frac{51}{153}$	$\frac{58}{174}$	14	106	60	46	69
	Σ	425	269	$\frac{58}{178}$	$\frac{60}{186}$	13	548	204	50	81
1945	5	116	61	$\frac{46}{143}$	$\frac{54}{167}$	14	83	38	33	63
	6	107	65	$\frac{51}{154}$	$\frac{56}{168}$	13	106	65	61	100
	7	220	154	$\frac{63}{195}$	$\frac{70}{218}$	17	112	98	44	63
	8	69	47	$\frac{82}{254}$	$\frac{78}{218}$	8	101	47	68	100
	9	223	150	$\frac{49}{148}$	$\frac{60}{180}$	17	87	78	35	52
	Σ	735	477	$\frac{58}{179}$	$\frac{64}{195}$	14	489	326	49	76

注) RN : 降雨量 (mm)

RNN = $0.9 (RN - 4.0)$ mm

ARN : 有効雨量 (mm)

EOD/EOM : 上段 日計器蒸発量 /

ETD/ETM : 上段 日蒸発散量 /

カンガイ水量 19mm								
RN	RNN	EOD EOM	ETD ETM	SM	I	ARN	ARN RN	ARN RNN
97	59	46 142	50 154	% 10	46	47	% 49	% 80
204	141	35 106	50 151	18	30	120	59	86
54	39	77 229	67 206	1	78	29	53	73
120	85	76 236	65 201	-1	70	62	52	73
250	196	50 149	52 155	8	58	54	22	27
725	520	57 174	57 174	7	282	312	47	68
122	85	51 155	49 153	6	26	85	70	100
221	168	43 129	53 158	14	39	92	42	55
432	352	50 155	57 176	14	72	96	22	27
60	32	67 213	61 190	4	78	32	54	100
31	10	59 177	51 152	-1	78	10	31	100
866	647	54 166	54 166	7	293	315	44	76
112	68	45 140	50 154	11	58	46	42	69
54	32	58 173	54 162	5	78	32	59	100
50	27	68 210	59 180	2	97	27	54	100
78	54	69 214	61 189	2	58	54	69	100
131	88	51 153	52 157	9	70	67	51	76
425	269	58 178	55 168	6	361	226	55	89
116	61	46 143	50 154	10	53	46	39	75
107	65	51 154	50 147	6	74	65	61	100
220	154	63 195	65 201	12	67	111	51	72
69	47	82 254	72 222	1	65	47	68	100
223	150	49 148	56 167	13	47	93	42	62
735	477	58 179	59 178	8	306	362	52	82

下段 月計器蒸発量 (mm) SM: 土壌含水比月平均 (%)

下段 月蒸発散量 (mm) I : カンガイ水量 (mm)

なお，月集計値をとるとカンガイ水量 I と計器蒸発量 E_0 の関係は Fig. IV-1 のようにほぼ一次関係で近似できるようである。たとえば，

土壌水分指標カンガイ

$$1 \text{ 回カンガイ水量 } 29 \text{ mm} \quad I = 1.363 E_0 - 92.380$$

$$\text{ " } \quad 19 \text{ mm} \quad I = 1.292 E_0 - 81.292$$

月集計値としてあつかうと Table IV-1, 2, 3 からわかるように，土壌水分状態が同じカンガイ方法でカンガイする限りにおいては，ほぼ一定値であるので，上記のような一次関係があらわれるものとみることができる。

このように，カンガイのタイミングと 1 回カンガイ水量を変えることによって土壌水分状態，蒸発散量 ET ，カンガイ水量が大きく異なってくることがわかった。そこで，このような場合の有効雨量はどのように変動するかを 10 年平均値をとって若干検討する。

3-1 カンガイのタイミングによる有効雨量の差異

上記の四つのケースについて，月降雨量 $RN(x)$ と有効雨量 $ARN(y)$ ，降雨有効率 $ARN/RN(y')$ の関係を示すと Figs. IV-2(1), 2(2) 及び 2(3), 2(4) のようになる。 RN が 200 mm を越す場合は，一連続降雨が 100 mm 以上となるような大きな雨の日を含み， ARN 及び ARN/RN 共に低い値となる。したがって，このような値を除外して月降雨量 RN 200 mm 前後以下の値について $RN(x)$ と $ARN(y)$ の回帰直線および降雨有効率 $ARN/RN(y')$ % を求めると次表のとおりとなる。

Table IV-4 カンガイのタイミングおよび 1 回カンガイ水量の多寡による降雨有効率の差異 (全平均)

カンガイの タイミング	1 回 最大 カンガイ水量	$RN(x)$ と $ARN(y)$ の 回 帰 直 線 式	降雨有効率 (y') (y'') **
土 壌 水 分 指 標	29 mm	$y = 0.438x + 0.860$	$43 \pm 10\%$ * (67 ± 26) %
同 上	19	$y = 0.522x - 2.070$	50 ± 9 (73 ± 25)
間 断 日 数 一 定	29	$y = 0.492x + 0.567$	50 ± 10 (74 ± 25)
同 上	19	$y = 0.545x + 0.243$	55 ± 8 (79 ± 24)

* (平均値) \pm (標準偏差)

** $y'' = (ARN/RN) \times 100\%$

以上のデータの処理は、月別集計とせず、カンガイ期全体を通じての月単位データの平均としてあつかったものであり、偏差が大きい（とくに $y'' (=ARN/RNN \times 100\%)$ の値の標準偏差は大きい）が、一応上表の結果から考察を進めることにする。

カンガイのタイミングとして土壌水分指標の場合と間断日数一定の場合を比較すると、後者の方が29mmカンガイで7%、19mmカンガイで5%降雨有効率が向上していることがわかる。これは後者の場合、平均の残留有効水分がより小さく、土壌水分が乾燥側に保たれたことが大きく影響しているためと考えられる。

3-2 1回カンガイ水量の多寡による有効降雨量の差異

1回カンガイ水量29mmと19mmの場合を比較すると、上表の結果から、後者の場合の降雨有効率の方が土壌水分指標カンガイで7%、間断日数一定カンガイで5%程度高い値を示している。これは、後者の場合、土壌水分レベルが若干低く保たれ、しかも表層カンガイによってカンガイ対象土層下半部は貯水タンクとしての機能をはたす機会がより多く生起することによるものと考えられる。

4 総 括

本章では有効雨量の算定に従来から用いられている bank account method を一部改良し、日ET量の項に関し月間平均日ET値を用いず、日ET量を有効水分残留量と気象条件としての計器蒸発量 E_0 とから線型回帰分析して統計値として求めるという方式をとって算定式に代入した。この新しい算定式によって、10年間のカンガイ期日データを用いて有効雨量の算定を行なつて次のような結果を得た。

(1) 1回少量多数回カンガイ（いわゆる表層カンガイ）の方が1回多量少数回カンガイの場合よりも土壌水分レベルは低く保たれ、したがってET量も若干小さい。そして必要カンガイ水量は前者の場合かなり少なくなるようである。

(2) 同じく前者の場合の方が有効雨量および降雨有効率を数%高く見込むことができるようである。これは、土壌水分が若干低く保たれ、しかも表層カンガイによってカンガイ対象土層下半部が貯水タンクとしての機能をはたす機会がより多く生起することによるものと考えられる。

本章における計算は主として新しい有効雨量算定方式をチェックすることを目的として、例示的に行なったものに過ぎない。したがって、上記の諸結果はホ場における実験によって確かめられたわけではなく、まして作物の生理生育と関連づけて考察されたものでもない。第I章で述べた根群域下層から表層への土壤水分毛管移動現象を有効雨量算定方式に有効に、かつ定量的におりこむこともできなかった。わが国の畑地カンガイの基本理念である“補給カンガイ (supplementary irrigation)”においては、いかに降雨量を有効に利用するかということが計画の要 (かなめ) となるべきものである。したがって、今後、降雨を最高度に有効利用しうるようなカンガイ方式に関する理論的、実験的研究の必要性が強く感じられる。

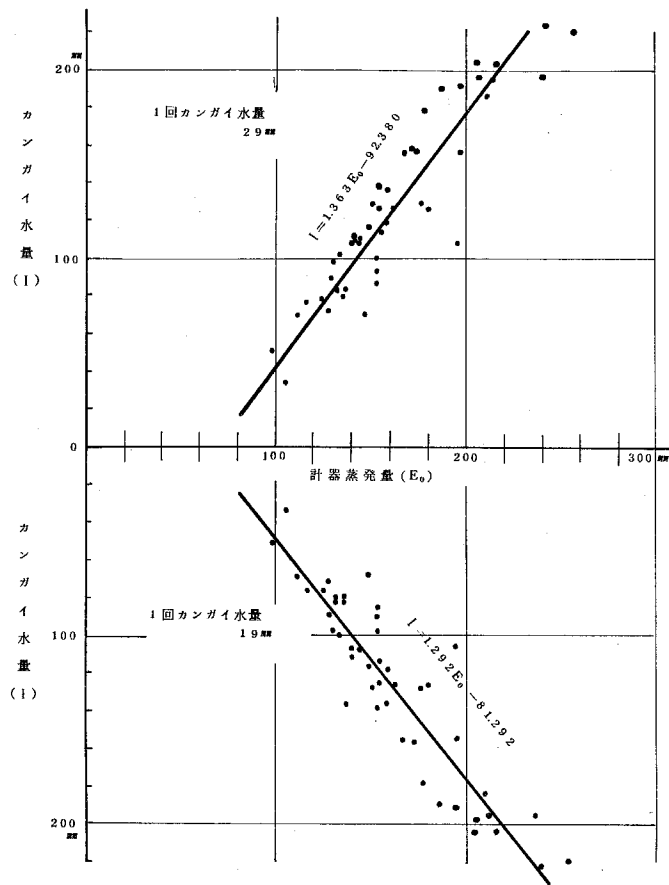
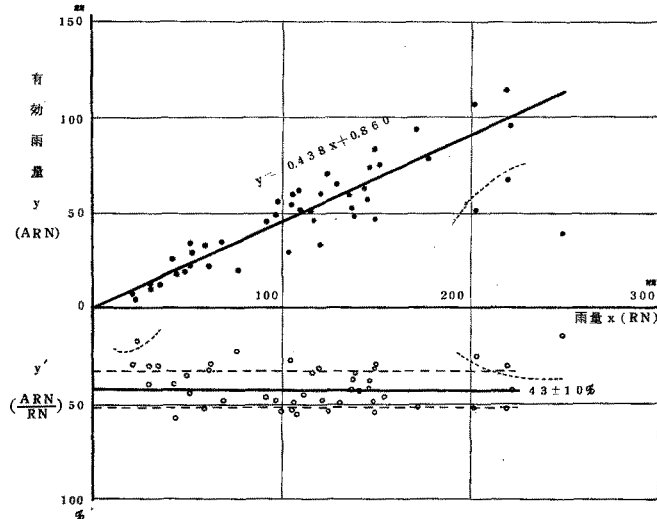
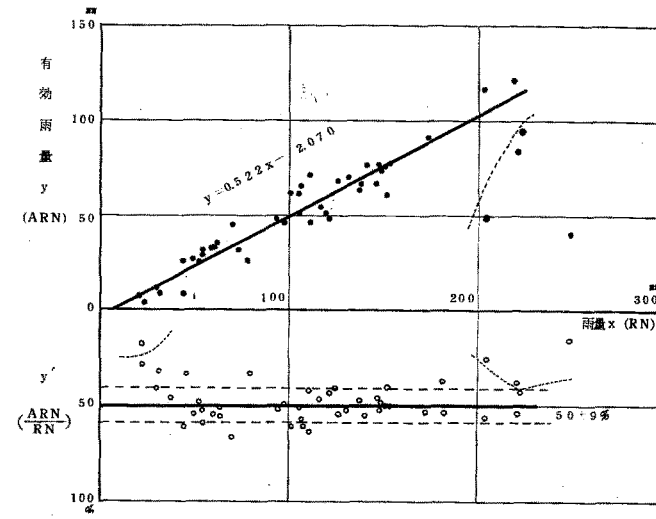


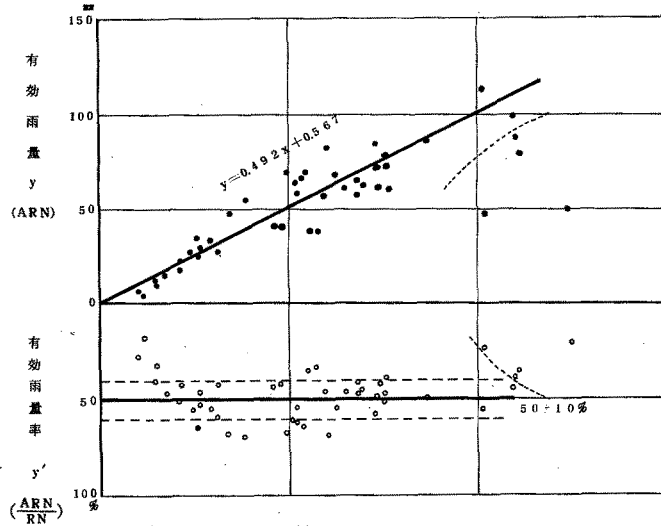
Fig. VI-1 計器蒸発量とカンガイ水量との関係
(土壌水分指標)



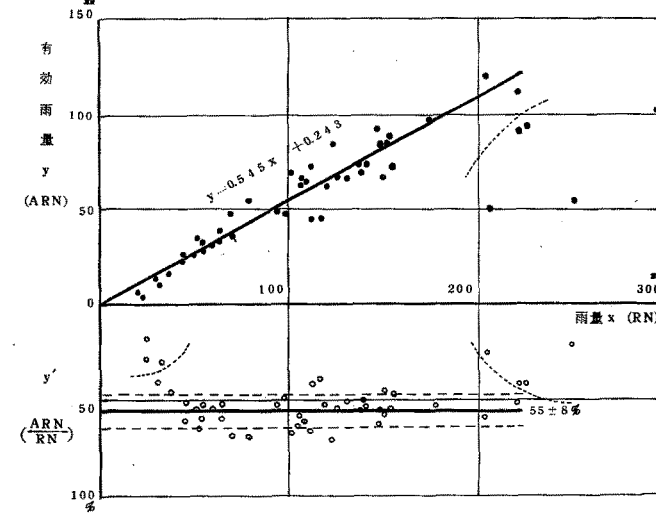
(1) 土壌水分指標 カンガイ水量 29.5 mm



(2) 土壌水分指標 カンガイ水量 19.4 mm



(3) 間断日数一定 カンガイ水量 29.5 mm



(4) 間断日数一定 カンガイ水量 19.4 mm

Fig. IV-2 月降雨量と月有効雨量との関係

V 散水カンガイの効率，スプリンクラー散水 性能と配列間隔について

1 ま え が き

散水カンガイの効率を高めようとする場合，スプリンクラーの散水特性を知り，遭遇する種々の条件に対して最適の器種，作動水圧，配列間隔などを設定しなければならない。

これらについて従来より内外においてかなり多くの研究成果が蓄積されている。まず，基礎的な研究としてスプリンクラーからの噴出水流の破碎機構と飛跡については，Levine¹⁾らが圧力およびノズル口径と水滴粒度分布について実験データを報告している。さらに井上²⁾は噴出水の中の粒度分布は上限関数に従うというMugeleおよびEvans³⁾らの理論を詳細な実験的研究によって確かめている。飛跡については桑野⁴⁾がStokesの法則による解析を行なって傾斜地散水の実際面に結びつけようとする試論的研究を行ない，また最近では岡村^{5,6)}が空気抵抗および飛しょう中の水滴の蒸発を考慮した水滴の運動方程式を各種条件下で解析してそれぞれの運動軌跡を理論的に求め，実験結果ときわめて近似した一致を見出したことを報じている。次に，水滴の蒸発を論じたものに，白井⁷⁾の飛しょう中の水滴の蒸発と散水効率を結びつけようとした研究，FrostとSchwalen⁸⁾らによる各種器械的条件，気象条件下での散水効率について行なった膨大な実験データとそれらの計算図表が報告されている。また散水パターンの風による影響については，前記FrostとSchwalenらの他に，太田⁹⁾が実験的研究を行なっている。

次に散水パターン，スプリンクラー配列間隔や散水カンガイの効率についてはChristiansen¹⁰⁾，Israelsen¹¹⁾をはじめ，Woodwardら¹²⁾による実験的研究とそれらを集大成したマニュアル，計算図表などが出されている。しかしわが国ではこれらに関する実験データの集積が十分でなく，設計基準とされているものも米国で用いられている値を準用していることが多いようであり，とくに傾斜地散水の特質については筆者らの得た実験データ^{13,14)}のほかにあまりまとまったものが出ていないように見受けられる。¹⁵⁾

また上に述べた噴出水の運動に関する基礎的な研究と現在のわが国の設計基準に示された内容とははるかに懸隔していて，その間を埋めるべき詳細な実験的研究の必要性が強く

感じられる。このような観点から、これらの関係——とくにスプリンクラー散水性能，風による影響，スプリンクラー配列間隔，散水効率および散水配分効率など——を明らかにするために，以下の項目について一連の研究を行なった。

平地の場合

- (1) 裸地・無風状態・単一散水試験
- (2) 裸地・風速階級別・単一散水試験（風速0～4 m/sec）
- (3) (1)，(2)の結果から図上複合計算により適正配列，配分効率の算出
- (4) 裸地・4本複合散水試験
- (5) 樹園地内・4本複合散水試験（風速0～2 m/sec）
- （5・1）散水効率，配分効率
- （5・2）枝葉付着水量の測定

傾斜地の場合

- (6) 裸地・無風状態・単一散水試験
- (7) 裸地・風速階級別・単一散水試験（風速0～3 m/sec）
- (8) (6)，(7)の結果から図上複合計算により適正配列，配分効率の算出
- (9) 裸地・4本複合散水試験
- (10) 樹園地内・4本複合散水試験
- (11) 樹園地内・多数複合散水試験（既設の大規模カンガイ施設を利用）

われわれの行なった本試験の初年度（昭和37年）には，樹園地内散水の特性を知るために，まっ先に樹園地内散水試験に入っていた。¹⁶⁾しかし結果的には，枝葉による遮断の影響を強く受けて，散水の風による影響，効率，地形傾斜度による影響の特徴などを明確につかむことができずに終わった。それゆえ，本格的試験に入った次年度からはまず散水器種，ノズル，ノズル圧などの組み合わせを後述のように1種類にしぼり，平地裸地無風時単一散水試験から始めて，図上複合計算結果と複合散水試験結果とが実用範囲でよく適合することを確かめた後，複合散水試験や樹園地内散水試験については最適配列間隔を確かめることを第一の目的とするような，段階を追った試験を進めてゆくことにした。

2 試験方法

2-1 使用器種および条件

試験に供したスプリンクラーはSS30F2, RBNo.30 (以上中圧スプリンクラー) , SS60F, RBNo.70 (以上高圧) の4器種で, ノズル口径, ノズル圧をTable V-1のように定めた。

Table V-1 供試スプリンクラー規格および条件

		ノズル口径	ノズル圧	ライザー高*
中圧	SS30F2	4.8×3.2 mm	2.5 kg/cm ²	1 または 3 m
	RB.No.30	3/16×3/32 インチ	3.2 "	1 または 3 "
高圧	SS60F	7.2×4.8 mm	4.5 "	1 または 3 "
	RB.No.70	6.4×4.8 1/4×3/16 インチ	4.0 "	1 または 3 "

* 裸地においては1m, 樹園地においては3m (平均樹高2m)

散水量の観測は平地および緩傾斜地では2m間隔の各格子点 (単一散水試験の場合中心部では1m間隔方眼とした) において径20cmの受水カンを用いて行なった。急傾斜地では斜面上半面のみを対象とし, Fig.V-1のような放射状の受水カン配置とした。

気象条件としては風向風速, 計器蒸発量, 気温 (散水域内, 外) を観測した。散水時間は試験の目的に応じ30分~60分とした。

なお, ノズル圧はブルドンゲージで測定し, 対応する噴出量は別途行なった噴出量試験から作成した圧力~噴出量関係カーブにより求めたものである。

3 散水効率 (E_a)

3-1 散水効率と気象条件との関係

散水効率 (E_a) に関与する要素としては気象条件とノズル口径, 圧力, ライザー管高さなどの器械的条件から決まる水滴粒度分布とそれに散水強度 (r_i) であるが, いま器械的条件は一定であるので除外して考える。

適正配列間隔 (後述) による裸地4本複合散水試験の結果から, E_aとE_o (計器蒸発量)

との関係を r_i をパラメータとしてあらわすと Fig. V-2 のようになる。実測範囲内では E_a は 94 ~ 77 % の間、対応する E_o は 0.3 ~ 0.8 mm/hr の間にあり、 E_o と E_a は一次関係で示されるようである。そして r_i が大きくなると一次関係的に E_a は増大するようである。このことは同一気象条件のもとでは、散水強度を増すと散水効率が増大することを示しており、その関係はほぼ次式で近似される。

$$E_a = \frac{10}{7} r_i + A \quad A: \text{定数}$$

実際には樹園地で 10 本 ~ 20 本ぐらいのスプリンクラーを 1 ローテーションブロックとして同時に作動させる場合は、地域全体としての相対湿度上昇、気温低下、樹園地の方が相対湿度が高いことにより蒸発飛散損失は小さくなるから、Fig. V-2 における E_a の値はその気象条件下での最小値と解釈してよいであろう（後述）。

3-2 葉面付着水量

樹上散水カンガイの場合には葉面付着による散水の損失を考慮しなくてはならない。

(1) 裸地と樹園地の散水効率 (E_a) の比較

葉面付着による損失水量は枝葉の形状、繁茂の程度、栽植密度および気象条件などによって影響を受ける。まず裸地と樹園地の E_a を比較すると Table V-2 のとおりである。試験時の気象条件も同表に示した。表中裸地区の値は 4 本矩形配列散水試験結果、樹園地区はミカン園における 1.6 m × 1.6 m 4 本複合散水試験結果から E_a を算出したものである。後者の場合、2 m 方眼に置いてある受水カンを散水後半に 1 m ずつ一方向に平行移動させ、樹冠遮断による分布の不均一性を若干補正したものである。散水条件、気象条件が若干異なり（なるべく同一に近い気象条件下における値を Table V-2 に挙げたが）、とくに樹園地内での散水量観測値は樹冠遮断による分布の乱れの影響を受けて、裸地状態における観測値と同一精度ではあつかえないということなどはあるが、一応散水効率は樹園地内で約 4 % 低下していることがわかる。

Table V-2 裸地と樹園地における散水効率 E_a の差異

	スプリンクラー	散水時間	天候	平均風速	E_o	E_a
裸地	RB No. 30	60分	曇	0.88m/sec	0.15mm/hr	88.0
	"	"	晴	2.49	0.10	89.5
	平均					88.7
樹園地	SS 30 F2	40分	晴	0.32m/sec	—	84.2
	"	"	晴	0.28	—	85.1
	平均					84.7

注) E_o : 計器蒸発量 E_a : 散水効率

(2) 付着水量の直接測定

次に葉面付着による損失水量を同一園内の1本のミカン樹について直接測定した。既知量の水を樹上からジョウロで散水し、樹下に敷いたビニールシートに滴下する水を受けて損失水量を測定した結果の1例をTable V-3に示す。

Table V-3 散水の樹冠遮断による損失

観測回	散水開始時 (分)	散水量 (mm)	樹下受水量 (mm)	樹冠遮断 損失量(mm)	樹冠遮断 損失率(%)
1	0	3.6	2.9	0.7	19.4
2	18	3.6	3.2	0.4	11.1
3	23	3.9	3.5	0.4	10.3
4	45	8.2	8.0	0.2	2.4
5	69	8.3	7.9	0.4	4.8
合計 (平均)	—	27.6	25.5	2.1	7.6 (平均)

注) 散水終了時 75分

総散水量 $78.8\ell / 2.85\text{m}^2$ (樹冠平面積) / 75分
 $= 27.6\text{mm} / 75\text{分}$

この例は合計27.6mmの水を5回にわけて散水（全量散水に要した時間は75分）し、そのつど損失水量を算出してゆき、樹冠遮断損失率（葉面付着損失率）の経時低減を調べたものである。損失率は散水量（散水回数）を増すにつれて低下し、やがて一定値（数%）に近づいてゆくようである。これは初期には葉面付着により損失が大きく出るが、一定量が付着した後は葉面付着水の蒸発損失が主になってくるからであろう。本測定例では全体の損失率は7.6%となった。

他の測定例——総散水量18.1mm/45分を2回にわけて9.0mm, 9.1mmずつ散水——においては損失率8.0%という結果を得た。上記2例における損失水量はそれぞれ2.1, 1.4mmであった。この2例による結果を一応平均して損失率7.8%とみなすと、このホ場の樹冠隠ぺい率（樹冠平面積の全ホ場面積に占める割合）は0.6であったから、ホ場全体としての樹冠遮断損失率は4.7%となり(1)項の結果とほぼ一致した。

一方、葉面付着水はそれだけ葉面蒸発を抑制するから、葉面付着水を損失とみなす必要はないという議論もある。しかし葉中の水とは自由エネルギーに差があって蒸発しやすいこと（事実日中外周部葉の付着水はたちまちのうちに蒸発してしまうようである）から考えて、少なくとも一部分は損失水とみなすべきであると思われる。したがって、ここで得た4~5%の値は損失率の最大値とみなしてよからう。

(3) シキワラ付着水量

シキワラ付着量を実測してみると、シキ厚5cmの場合で1.5~2.0mm程度であった。付着水による土壌面蒸発抑制の効果は明らかに考え得るが、一部分1mm程度は損失とみなすべきであろう。

4 散水の風による影響

4-1 散布図型に及ぼす影響

単一散水試験の結果はすべてFig.V-3の様式に統一してあらわし、風向風速観測値からウインドローズ(wind rose)⁹⁾を作成し、その他試験の条件、散水効率(E_a)、散水面積などを算出してそれぞれ記入した。このような試験を0~4m/secの各風速段階で行なった。

まず単一散布図型の平面形に着目すると、Fig.V-4に示したように、風速0.5~1.0

m/sec の段階では風に直角方向を長径とするダ円形に変形しているのが見られるが（吹きかえし効果が出ているものと考えられる），1.0 m/sec を越えると次第に長径が風向方向に伸びる卵形となってくる。風速が増大するにつれてこの傾向が助長されると共に散布図形の中心は偏心度を増す。偏心距離 r ，変形率（長径/短径） η ，風下半径/風上半径の比 w と風速との関係について，RB.No.30とRB.No.70の散水試験結果をもとにFig. V-5に示した。同図によると，偏心距離 r は風速2.5 m/sec程度で，中圧，高圧共に4 mに達し，変形率 η は中圧，高圧共に風速0～1 m/secの段階では0.95程度になるが，風速が増すと2.5 m/sec程度で中圧1.15，高圧1.10程度になるようである。風下半径/風上半径（ w ）については，風速が増すと急激に大きくなり，風速2.5 m/secで，中圧1.8，高圧1.6程度と，中圧スプリンクラーの方が風の影響を受けやすいことを示している。これらの関係はFig. V-4(1)，(2)からも直視的に判定されるようである。

風速が2.0 m/sec程度から，それ以上になると，スプリンクラー位置を中心に風向の左右両側に極大散水量分布を示す域（濃密部）が2カ所にわかれて現われてくるようになる。これは風に逆らってノズルから噴出した水流の一部が風によってスプリンクラー位置付近（とくに風に向かって左側）に吹きかえされてくることによる。この問題は太田⁹⁾によって実験的に詳しく解析されているが，それによると，メインノズルから噴出された比較的粒径の大きい水滴が飛しょう速度低減に伴って吹きかえされることに起因する。この影響は高圧スプリンクラーの場合には水流飛跡が高くて風の影響をより強く受けるので，より大きく現われるようである。（例えばFig. V-4(1)，(2)の風速2.5 m/secにおける散布図型にみられる中圧と高圧スプリンクラーの差異を参照）

4-2 配分効率に及ぼす影響

単一散水試験の結果から，各風速階級ごとに，その散布図型を図上計算によって種々の間隔に組み合わせて，4本複合時の散水分布図型を得た。その結果はFig. V-6の様式に統一してあらわした。そしてこれらによって種々の組み合わせに対する均等係数（ C_u ），配分効率（ E_p ）を算出して以下の考察を行なった。なお，適正な配列間隔の組み合わせについては，裸地において4本複合散水試験を行なって図上計算による散水分布図型を確かめることとした。

配分効率に着目し，中圧，高圧スプリンクラーについて，無風時の適正配列間隔のままにして風速が増大した場合に E_p はどのように低下してゆくか，一方風速に応じて最適配

列間隔を見出し、その配列間隔によって散水すると E_p 低下をいかに防ぐことができるかをFig. V-7に示した。これによると、最適配列間隔を採ると中圧、高圧共に風速0～4 m/secの間において90%以上の値を保つことができる。この場合、中圧スプリンクラーの方が高圧に比べて2～3%高い E_p を得ることができるようである。

Fig. V-7中の点線のように、無風時の適正配列のままにしておくと、風速3～4 m/secになると $E_p < 80\%$ にまで低下する。また風速2～3 m/secを越えると、高圧スプリンクラーの E_p 低下率は中圧に比較して大きくなるようである。これは先に述べた理由によって、高圧スプリンクラーにおいて散水深の濃密部が発生しやすいためであると考えられる。

いずれの場合も、風速2 m/sec以上となって図型に濃密部が発生してくるようになると、高い E_p 、 C_u 値を得ようとすると配列間隔をかなり大きく縮小しなければならない。それらの関係は後掲のTable V-4に一括して示したとおりである。

5 適正配列間隔について

各風速段階別に単一散水試験による散布図型を図上で種々の間隔に組み合わせ、適正配列間隔を見出そうとした。そして適正配列間隔と思われる配列については実際に4本矩形配列散水試験を行なって、図上組み合わせ計算結果をチェックした。これらの試験と計算によって、種々の組み合わせに対する E_p 、 C_u 、 r_i （散水強度）を求め、それらを一括してTable V-4に挙げた。表中太線で囲んだのが適正配列間隔における E_p 、 C_u 、 r_i の値である。ここでいう適正配列間隔とは $E_p \geq 90\%$ を限度とし中央部散水深が小さくならない程度で最も大きい間隔をもつ配列の意である。

Table V-4 風速階級別、各スプリンクラー配列間隔における配分効率 E_p 、均等係数 C_u および散水強度 r_i

中圧スプリンクラー (RB.No.30)

風速階級	調査時 平均風速		ス プ リ ン ク ラ ー 配 列 (m)											
			20×20	20×18	20×16	18×18	18×16	18×14	16×16	16×14	16×12	14×14	14×12	14×10
m/sec 0~1.0	m/sec 0.9	E _p (%)	89	90	91	93	94	95	96	97	98	96	97	97
		C _u (%)	74	77	79	83	86	87	90	92	94	92	93	95
		r _i (mm/hr)	4.3	4.8	5.3	5.2	5.9	6.7	6.5	7.4	8.7	8.4	9.8	11.6
1.0~2.0	1.5	E _p (%)	82	84	85	88	89	90	92	94	95	95	96	98
		C _u (%)	57	62	64	70	73	75	80	83	87	87	91	96
		r _i (mm/hr)	3.8	4.1	4.6	4.6	5.1	5.8	5.7	6.5	7.5	7.3	8.5	10.0
2.0~3.0	2.9	E _p (%)	76	78	80	82	84	86	88	90	92	93	95	97
		C _u (%)	48	51	54	60	63	66	73	77	80	83	88	94
		r _i (mm/hr)	4.1	4.5	5.1	5.0	5.6	6.4	6.2	7.1	8.2	8.0	9.3	10.9
3.0~4.0	3.9	E _p (%)	73	75	77	79	82	84	86	87	90	90	93	96
		C _u (%)	42	46	49	55	59	62	68	72	74	78	84	92
		r _i (mm/hr)	4.2	4.7	5.2	5.1	5.7	6.5	6.4	7.3	8.4	8.2	9.5	11.3

高圧スプリンクラー (RB.No.70)

風速 階級	調査時 平均風速		ス プ リ ン ク ラ ー 配 列 (m)											
			24×24	24×22	24×20	22×22	22×20	22×18	20×20	20×18	20×16	18×18	18×16	18×14
m/sec 0~1.0	m/sec 0.8	E _p (%)	88	89	90	90	91	91	92	92	93	93	93	95
		C _u (%)	76	76	76	76	77	78	76	77	80	77	80	86
		r _i (mm/hr)	6.8	7.4	8.1	7.8	8.2	9.6	9.5	10.5	11.8	11.7	13.0	15.1
1.0~2.0	1.7	E _p (%)	87	87	87	89	90	91	90	93	93	90	91	91
		C _u (%)	73	74	74	77	79	81	80	83	86	80	82	84
		r _i (mm/hr)	6.8	7.4	8.0	8.0	8.7	9.7	9.5	10.6	11.9	11.6	13.1	15.0
2.0~3.0	2.6	E _p (%)	85	86	86	89	89	90	91	92	93	92	92	93
		C _u (%)	71	71	71	77	78	79	81	81	96	83	85	87
		r _i (mm/hr)	7.3	8.7	8.7	8.6	9.5	10.6	10.3	11.5	13.0	12.6	14.3	16.3
3.0~4.0	3.9	E _p (%)	71	75	75	78	81	81	85	86	86	89	90	92
		C _u (%)	45	73	53	58	61	62	70	71	80	77	80	83
		r _i (mm/hr)	6.7	8.2	8.2	8.0	9.0	10.0	9.6	10.8	12.2	11.9	13.4	15.3

注) 太線で囲んだ値が適正配列における値である。

Table V-5 適正配列における間隔率および間隔

	風速階級 (m/sec)	無風時 散水直径 (m)	間 隔 率		配 列 間 隔		配分効率 (%)
			α_x	α_y	d_x (m)	d_y (m)	
中 圧	~0.5	3.1	0.58	0.58	1.8	1.8	98
	0.5~1.0	"	0.52	0.58	1.6	1.8	96
	1.0~2.0	"	0.45	0.52	1.4	1.6	94
	2.0~3.0	"	0.45	0.52	1.4	1.6	93
	3.0~4.0	"	0.45	0.45	1.4	1.4	90
高 圧	~0.5	4.1	0.54	0.54	2.2	2.2	93
	0.5~1.0	"	0.49	0.54	2.0	2.2	92
	1.0~2.0	"	0.49	0.54	2.0	2.2	91
	2.0~3.0	"	0.44	0.49	1.8	2.0	90
	3.0~4.0	"	0.44	0.44	1.8	1.8	89

注) d_x : 風に直角方向の距離 d_y : 風に平行方向の距離

表中の最適配列間隔をとり出して、間隔を無風時散水直径との比率であらわすとTable V-5 のようになる。風速が増すにつれて風向直角方向間隔 (d_x) を大幅に縮少し、平行方向間隔 (d_y) を若干縮小させると適正な散水分布が得られることがわかる。

例えば中圧スプリンクラーの場合、風速 0.5 m/sec 以下の時、間隔率 $\alpha_x \times \alpha_y = 0.58 \times 0.58$ 、配分効率 $E_p = 98\%$ 、均等係数 $C_u = 83\%$ 、散水強度 $r_i = 5.2 \text{ mm/hr}$ であるが、風速 2~3 m/sec の時には $\alpha_x \times \alpha_y = 0.45 \times 0.52$ 、 $E_p = 90\%$ 、 $C_u = 77\%$ 、 $r_i = 7.1 \text{ mm/hr}$ となる。高圧スプリンクラーの場合、同じく $\alpha_x \times \alpha_y = 0.54 \times 0.54$ 、 $E_p = 93\%$ 、 $C_u = 77\%$ 、 $r_i = 7.8 \text{ mm/hr}$ が、 $\alpha_x \times \alpha_y = 0.44 \times 0.49$ 、 $E_p = 92\%$ 、 $C_u = 81\%$ 、 $r_i = 11.5 \text{ mm/hr}$ となる。

また、いずれの場合も間隔を大幅に縮少すれば、 E_p 、 C_u を高く保つことができるが、適正配列間隔はできるだけ大きい間隔をとるべきだとの観点から上述のように考えた。

6 樹園地散水の特質

6-1 4本複合散水の場合の効率について

樹園地散水においては、樹上散水の場合、樹冠枝葉による散水遮断の影響を受けて散水量分布の不均一性が大きな特徴として現われ、 $C_u = 70\%$ 前後になることを知った。しかし、この問題はⅢ章で述べたように、實際上裸地における散水試験から得られる E_p （または C_u ）をそのまま適用しても何ら支障をきたさないことが判明した。したがって、樹園地散水においても配列間隔は裸地と変わらず、葉面付着水を考慮した散水効率のみを別途に樹園地散水の特質と考えればよい。問題が非常に単純化されたわけである。

以下に樹園地内4本複合散水の場合を想定してカンガイ効率を算定した例をあげて考察する。

(例1) 最もクリティカルな条件

スプリンクラー RB.No.70 (ノズル $1/4" \times 3/16"$, ノズル圧 4.0 kg/cm^2)

風 速 3 m/sec

計器蒸発量(E_o) 0.9 mm/hr

樹冠隠ぺい率 0.6

の条件下では、

(1) 適正配列間隔 $x=18 \text{ m}$ ($\alpha_x=0.44$) $y=20 \text{ m}$ ($\alpha_y=0.49$)

(2) 配分効率(E_p) $E_p=92\%$ ($C_u=80.8\%$)

(3) 散水強度(r_i) $r_i=11.5 \text{ mm/hr}$

(以上 Table V-4, V-5より)

(4) 散水効率(E_a) $E_a=82\%$ (Fig.V-2より)

(5) 葉面付着損失 L_1 $L_1=5\%$ (シキワラによる損失を含む)

(6) カンガイ効率 E_f $E_f=E_a \cdot E_p - L_1 \div 70\%$

(例2) 静穏な条件

スプリンクラー RB.No.70 (ノズル等は同上)

風 速 0.3 m/sec

計器蒸発量(E_o) 0.1 mm/hr 以下

樹冠隠ぺい率 0.6

の条件下では、

(1) 適正配列間隔 $x=2.2\text{ m}$ ($\alpha_x=0.54$), $y=2.2\text{ m}$ ($\alpha_y=0.54$)

(2) $E_p=93\%$ ($C_u=86\%$)

(3) $r_i=8.0\text{ mm/hr}$

(4) $E_a=95\%$

(5) $L_1=2\%$

(6) $E_f=E_a \cdot E_p - L_1=86\%$

以上の仮定条件は現実的に起り得る上下限と考えてよからうが、このような場合カンガイ効率 E_f は70～86%の間に入るようである。

6-2 多数複合散水の場合の効率について

実際の樹園地散水カンガイにおいては通常10～20本のスプリンクラーを同時に作動させる。したがって、散水域が大きくなるので地域的な相対湿度の上昇、気温低下、風の影響の緩和などによって、単一ないしは4本複合散水の効率に比較して若干向上することが予想される。そこで、既設の散水カンガイ施設を利用して同時に14本～10本のスプリンクラーを作動させ、散水域中央部において散布図型、散水量などを実測した。測定の方法などは2節で述べたのと同様である。Table V-6 にその結果をカンガイ効率を中心にまとめて、6-1項で述べた方法による計算値と対比させた。

この結果から散水効率 (E_a) について考察すると、実測値の方が計算値に比較して中圧で0.5%, 高圧で2.0%高くなっている。多数のスプリンクラーが複合されるために散水域内の相対湿度が高くなるためと考えられる。次に配分効率 (E_p) については、実測値の方が中圧で6.0%, 高圧で3.0%高い値を示している。配分効率に直接影響する因子は風速であるが、多数複合散水の場合は風上側のスプリンクラーの水膜 (水滴のカーテン、膜) によって風下側で風速の影響が緩和されることにより、実測値の方が高い値となったと考えられる。

以上の比較検討により、上記のような計算に基づくカンガイ効率 (E_f) は安全側となり、したがって、広域を対象とした実際の散水カンガイでは、場合によっては、計算値より4～5%高い E_f を採用することも考えられる。筆者らの多くの試験結果では、4本複合散水においては E_f は大概70～86%の範囲にあったから、広域を対象とする実際のカンガイにおいては $E_f=74\sim90\%$ 程度と考えてよからう。

施設の実際の運用にあたっては、風速、 E_o などの気象条件は容易に測定することがで

きるから、そのつど即座に E_f を算出し、散水時間を調節することによって常に適正な散水を行なって合理的な施設運用をすることも可能である。

Table V-6 多数複合散水と単ないし4本複合散水におけるカンガイ効率の比較

		実 測 値*			計 算 値**			(実測値-計算値)			試 験 条 件		
		E_a (%)	E_p (%)	E_f (%)	E_a (%)	E_p (%)	E_f (%)	E_a (%)	E_p (%)	E_f (%)	風 速 m/sec	E_o mm/hr	スプリンクラー -間隔 (m)
中 圧	1	77.1	94.7	73.0	77.0	90.0	69.3				26	0.90	16×14
	2	72.8	91.8	66.8	74.5	86.7	64.6				47	0.95	16×14
	3	83.8	95.0	79.6	81.0	86.7	70.2				43	0.72	16×14
	平均	77.8	93.8	73.1	77.4	87.8	68.0	0.5	6.0	5.1	—	—	—
高圧	1	94.0	89.0	93.0	92.0	86.0	79.0	2.0	3.0	4.0	02	0.18	22×22

注) 試験地： 中圧 かつらぎ町，和歌山県農業センター，牧草地，傾斜 10°

高圧 遠方，ミカン園，傾斜 15°

同時作動スプリンクラー数： 中圧14本，高圧10本

* 散水域は中央の一つの区画内における実測値

** 6-1項の方法で求めた値

7 総 括

樹園地樹上散水カンガイにおいてあらわれる複雑な現象も、裸地における散水状況から近似的に推定できることを見出し、裸地単一散水試験、図型の図上組み合わせ、裸地4本複合散水試験などを種々の気象条件、風速階級のもとに実施し、樹園地（平地、傾斜地）散水における適正スプリンクラー配列間隔、効率などについて次の事項を明らかにすることができた。

(1) 散水効率(E_a)に関して蒸発飛散損失と樹冠遮断損失（葉面付着損失）を別々に考察し、蒸発飛散損失を考えた効率 E_a と E_o の間に散水強度 r_i をパラメータとして一次関係のあることを見出しFig.V-2に示した。葉面付着損失については最大5%という結果を得た。

(2) 散布図型に及ぼす風の影響については図型平面形の変形（Fig.V-4, V-5），図型中心の偏心（Fig.V-5），散水濃密部発生に言及し、それらの適正配列間隔、 E_p に及ぼす影響についてTable V-4, V-5, Fig.V-7などにまとめた。

(3) 配分効率(E_p)を基準にして各風速階級別に適正配列、 E_p, C_u, r_i についてTable V-4, V-5にまとめた。

(4) 樹園地におけるカンガイ効率(E_f)に言及し、4本複合散水の場合70～86%の範囲にあり、広域を対象とした実際の散水カンガイで多数複合散水を行なう場合には74～90%に向上されるであろうことを明らかにした。



Fig. V-1 傾斜地散水試験 (受水カン配置の状況)

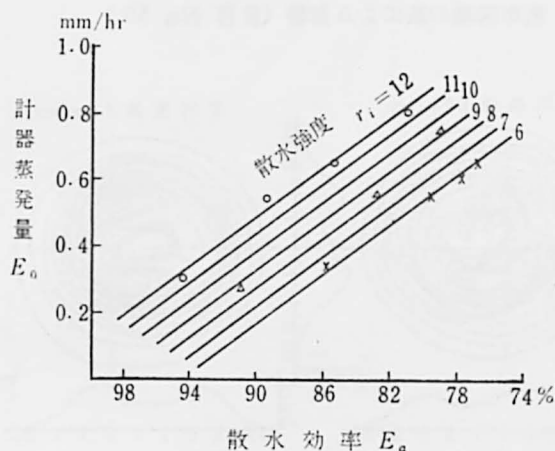


Fig. V-2
散水効率 E_a に及ぼす
計器蒸発量 E_0 および
散水強度 r_i の影響

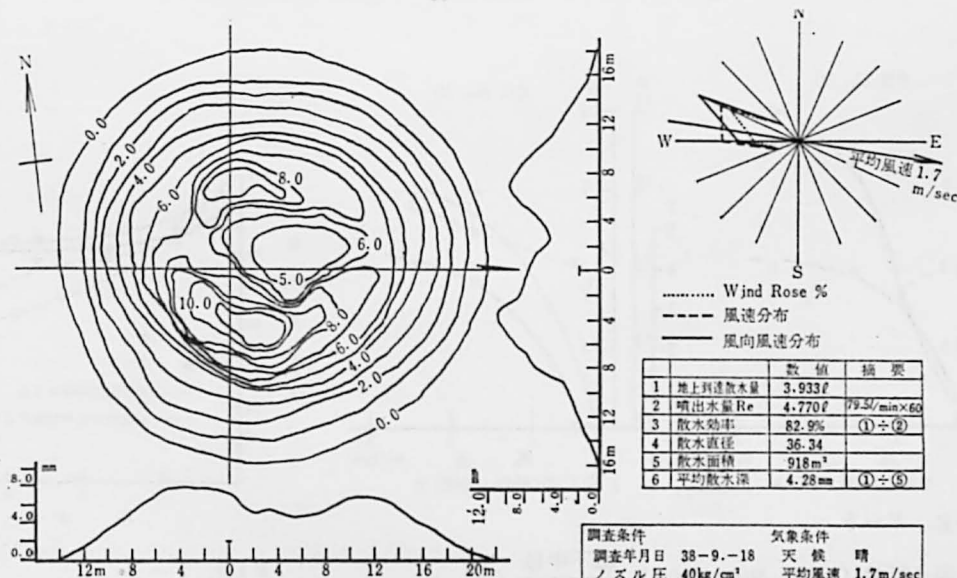


Fig. V-3 単一散水試験の結果表示の様式 (1)
(RB. N_0 , 70 の場合, 平地)

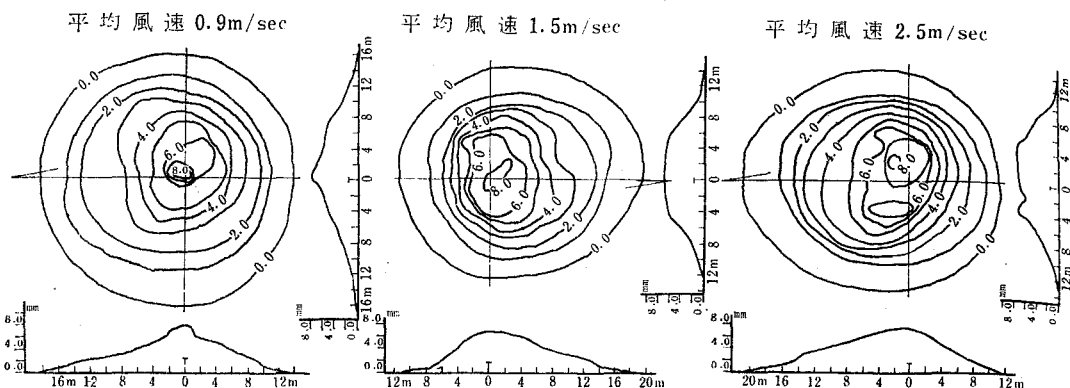


Fig. V-4(1) 散布図型の風による影響 (RB No. 30)

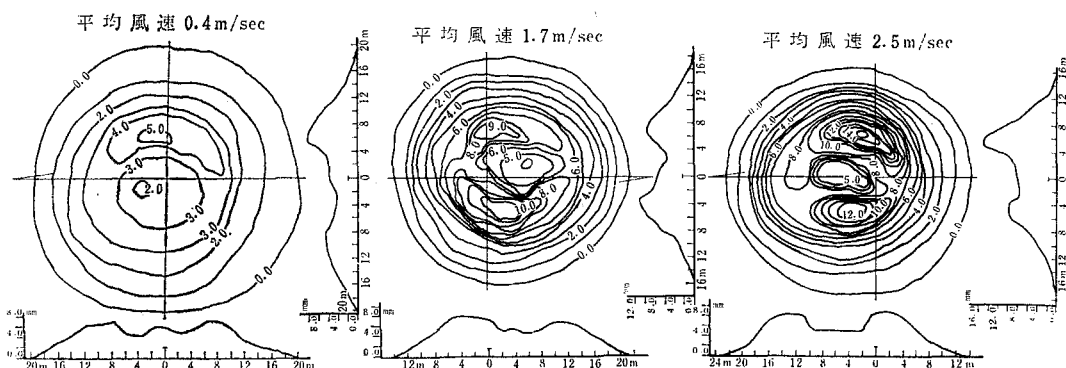


Fig. V-4(2) 散布図型の風による影響 (RB No. 70)

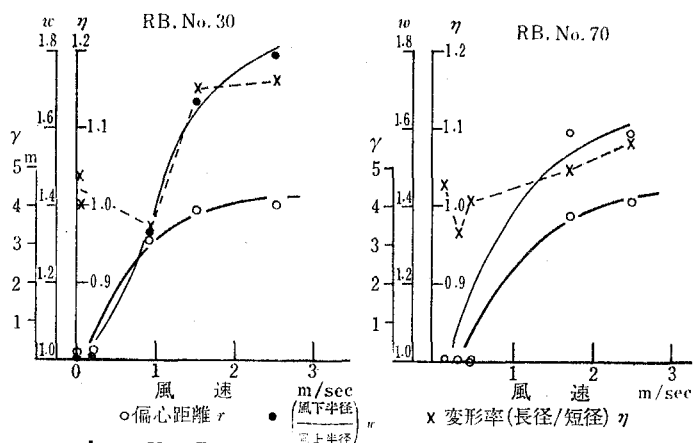


Fig. V-5

偏心距離 (r), 変形率 (η), $\frac{\text{風下半径}}{\text{風上半径}}$ (w) と
風速との関係

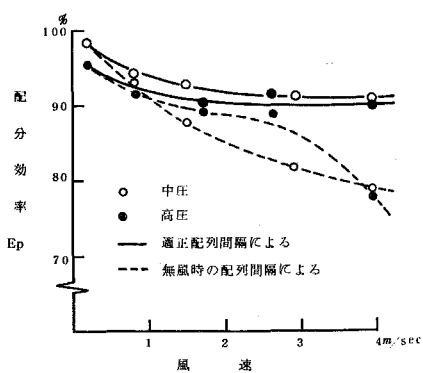


Fig. V-7.

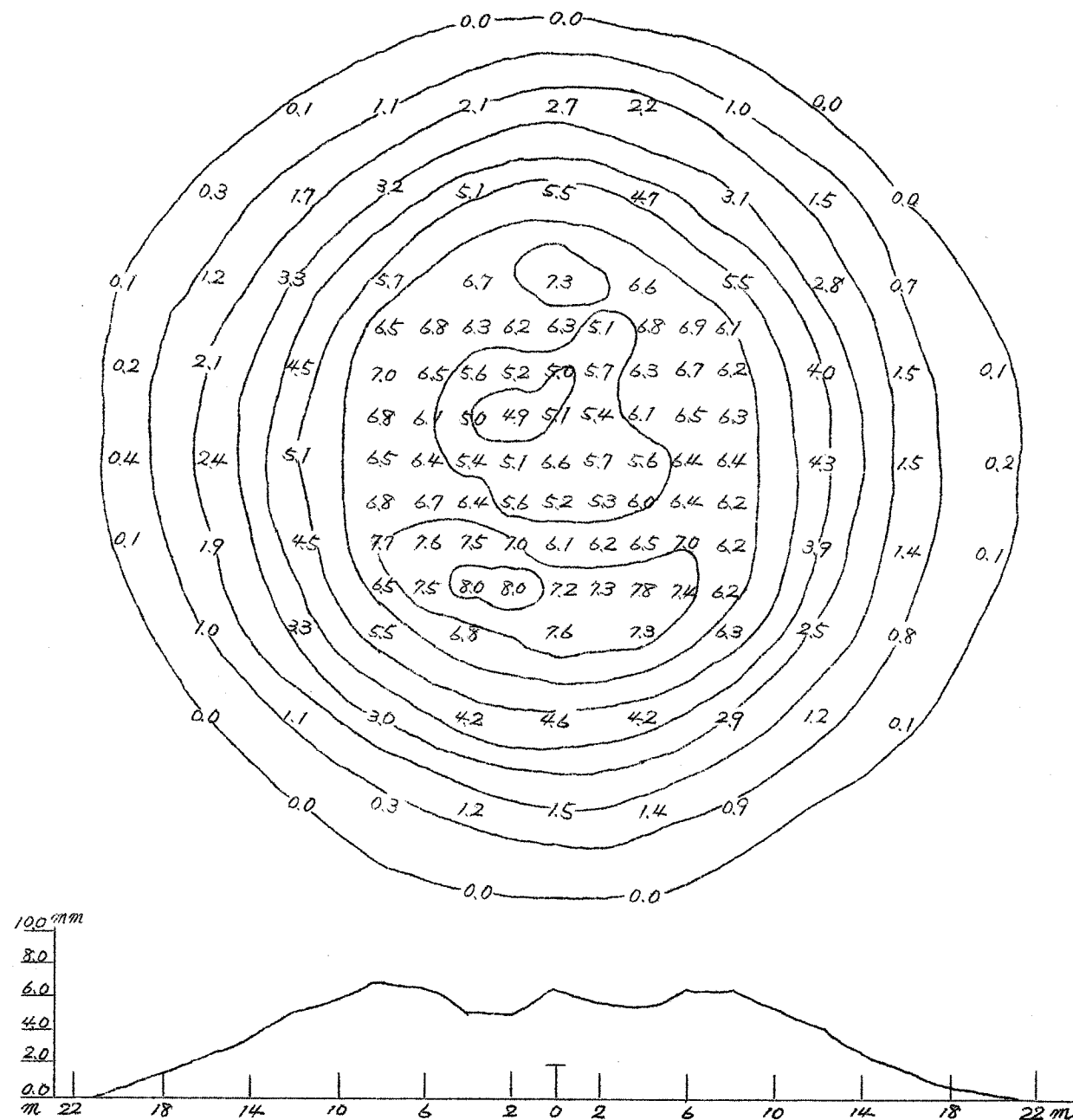
配分効率 E_p に及ぼす風の影響

散布図型

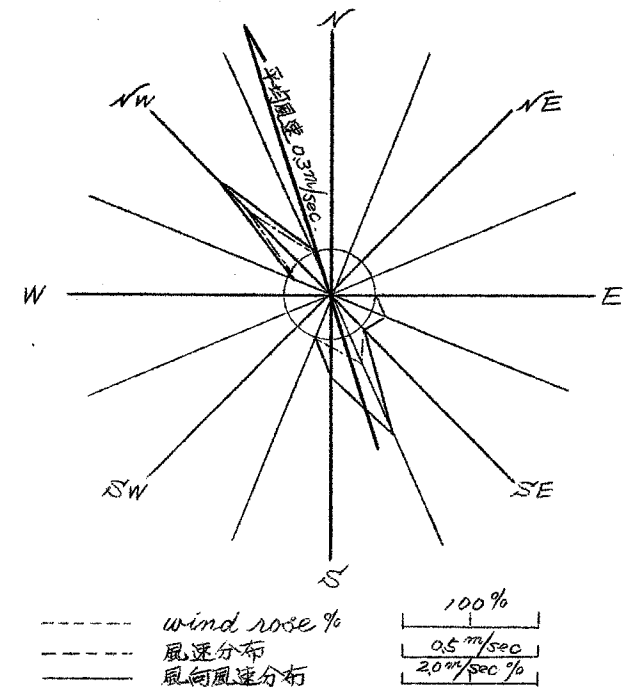
Scale 1:300

Rain unit: mm

高圧スプリンクラー RB NO. 70B $1/4 \times 3/16"$



風向風速



効率

噴出水量	4,770 l
地上到達雨量	4,413 l
散水効率	92.5%
平均散水深	3.4 mm
散水面積	1,312 m ²
散水直径(縦)	40.5 m
(横)	41.5 m

調査条件

調査年月日	38-9-15	天候	曇
ノズル圧	4.0 kg/cm ²	平均風速	0.30 m/sec
噴出量	79.5 l/min	気温	23°C
ライガー高	1.0 m	湿度	
調査時間	60 min	蒸発量	0.1 mm/hr

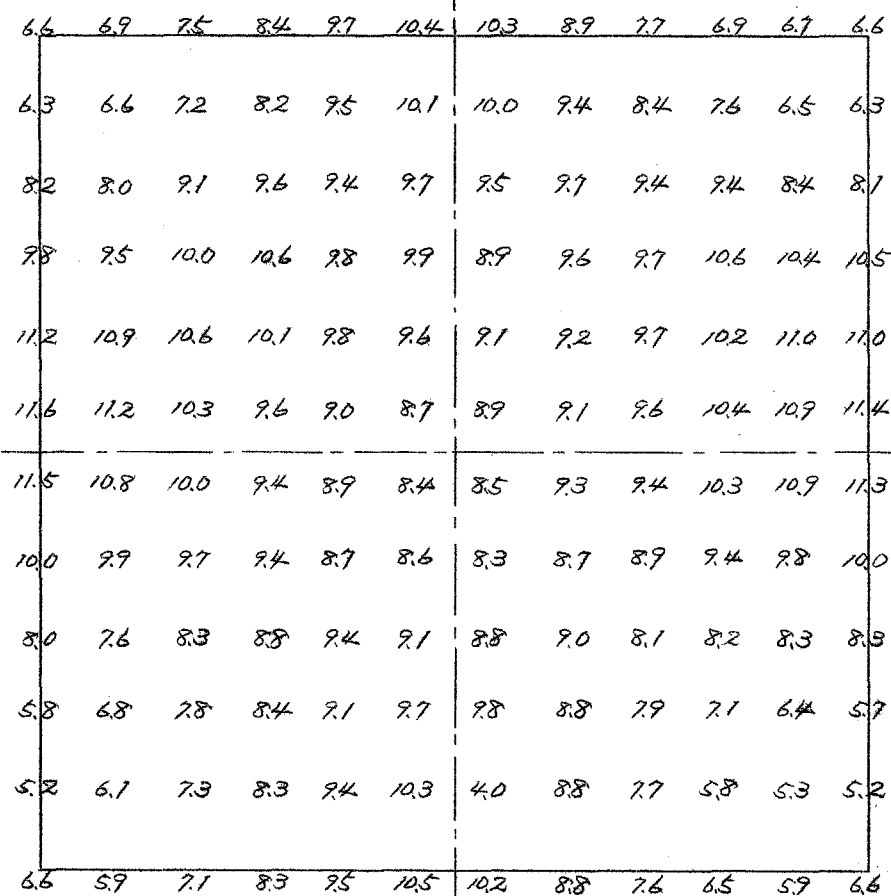
摘要

Fig. V-6 (1) スプリンクラー無毛地単一散布図型及び効率 様式 (1)

散布図型
Scale: 1:200
Rain unit: mm

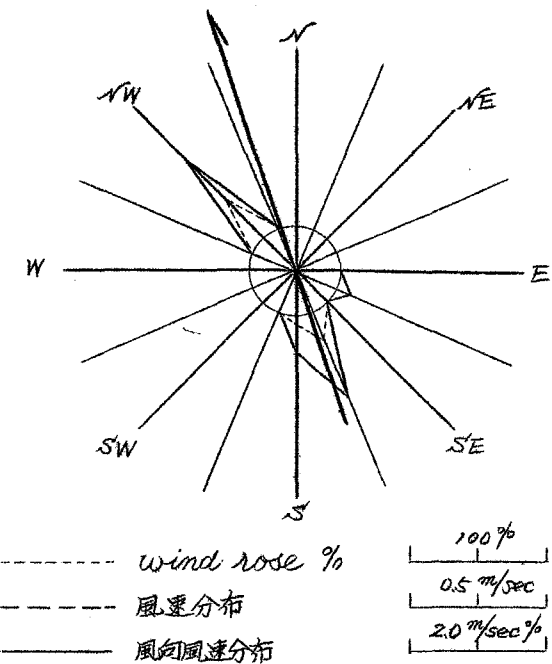
高圧スプリンクラー RB NO.70B $1/4 \times 3/16"$

図上配列 22 × 22m



12.0 mm
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0

風向風速



効 率

噴出水量	4,770 l
有効散水量	4,108 l
適用効率	$E = 86.1 \%$
散水効率	$E_a = 92.5 \%$
均等係数	$C_u = 86.1 \%$
平均散水深	8.8 mm
有効散水深	8.5 mm
$E_a \times C_u$	79.6 %

調査条件

調査年月日: 38-9-15 天 候: 曇
ノズル圧: 4.0 kg/cm^2 平均風速: 0.30 m/sec
噴出量: 79.5 l/min 気 温: 23°C
ライザー高: 1.0 m 湿度:
調査時間: 60 min 蒸発量: 0.1 mm/hr

摘 要

適用効率 = $\frac{\text{有効散水量}}{\text{噴出水量}}$

有効散水量: 平均散水深以上を霖層浸透損失として除外して計算
均等係数 × 散水効率 = 79.6%

Fig. V-6 (2) スプリンクラー無毛地図上4本複合散布図型及び効率 様式 (2)

Ⅵ 傾斜地散水の特質

1 ま え が き

わが国の樹園地，とくにミカン園はそのほとんどが傾斜地に分布するといつてよく，和歌山県紀の川，有田川沿岸のミカンドころでもたんねんに石積みを施した段畑が急斜面を頂近くまではい上がり，実に壮観というほかはない。このような地形には散水カンガイ方法以外には考えられず，またこのような地形こそ散水カンガイの得意とする場面である。従つて，傾斜地の散水特性を十分にはあくすることが必須である。ところがわが国は散水カンガイ技術を欧米から学んでまだ日が浅く，独自の傾斜地カンガイ技術の体系を作り出しているとはいひ難く，スプリンクラー配列なども適正でない場合が多いようである。傾斜地散水に関する研究面でも東海近畿農試における実験研究¹⁵⁾と桑野⁴⁾らによる試論を除いてはまとまつたデータは発表されていない。

本章では傾斜地散水の特質について若干の考察を行ない得られた試験結果の範囲内で効率，配列間隔の合理的な決定法に言及する。

2 傾斜地散水のある工夫——スプリンクラー回転軸を下方斜面側に傾けること——

傾斜地においてスプリンクラー回転軸を鉛直な状態にして散水すると，上方斜面では散水の到達距離が短くなる結果散水強度が著しく大きくなり，また傾斜角がある程度以上になると水流は破碎されないうちにはげしい勢いで地表面をたたき，散水域はリング状となる。また下方斜面では水流が高くなるために風の影響が大きく現われ，散水半径の増大，散水強度の減少が著しくなってくる。このような散水量分布の不均一性を是正する方法としては，現在の型式のスプリンクラーを使用する限りでは，スプリンクラー回転軸を下方斜面側に傾斜させることが考えられる。

2-1 回転軸を傾斜させた場合の水流飛跡

回転軸を $0 \sim 30^\circ$ の範囲で傾斜させて、噴出する水流の上縁の飛跡を測定して

Fig. VII-1 の実線のような曲線を得た。飛跡はその最高位置に達するまでは初速度 v の質点の等加速度運動でほぼ近似できるが、しかし水流は破碎されて大小の水滴に分離してくるために最高位置を過ぎると単純な放物線を描くことなく落下する。この時の水流飛跡および散水量分布、水滴の大きさ別の分布などはかなり複雑であり、実測によって決定する以外になかろう。

Fig. VII-1 中の点線は

$$\begin{aligned} x &= \xi v \cos \alpha \cdot t \\ y &= \xi v \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \quad \text{から} \\ y &= \tan \alpha \cdot x - \frac{1}{2} g \frac{x^2}{\xi^2 v^2 \cos^2 \alpha} \end{aligned} \quad (1)$$

の飛跡を描いたものである。ここに

x : 水平距離 (m)

y : 鉛直高さ (m)

v : スプリンクラー噴出水の初速度 (ノズルをオリフィスとして計算¹⁷⁾)
(m/sec)

α : 噴出角度 ($^\circ$) $\alpha = \beta + \gamma$

ξ : 空気抵抗で代表される平均的な抵抗係数

Fig. VII-1 によると飛跡の最高点を過ぎてからは実測値と全くかけ離れてしまうことが明らかである。

2-2 回転軸傾斜度

そこで、地表傾斜 (θ) に対するスプリンクラー回転軸傾斜度 (β) を求める基準として飛跡の最高高さを取り (Fig. VII-2) ,

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H_{\beta n} - H_0}{x_H} \quad (2)$$

ここに、 $H_{\beta n}$: $\beta = n^\circ$ に対する飛跡の最高高さ

$x_H : \beta = r^p$ に対する飛跡が最高高さに達する距離

として決定される θ を β に対する適正地表傾斜角とみなして散水すれば平地と大差ない散布図型が得られることを見出した。 $\beta \sim \theta$ の関係を 1 項の実測値から (2) 式によって求めると Fig. VI-3 のように直線となる。

2-3 回転軸を傾斜させることによって生ずる二, 三の問題⁴⁾

(1) 上半斜面に対しては主ノズルがカバーする角度が, Fig. VI-4 において 2δ だけ小さくなること。

$$\delta = \sin^{-1}(\tan\beta \cdot \tan r) \quad (3)$$

すなわち回転軸を $\angle\beta$ だけ下方斜面に傾けることによって, 水流の方向が等高線上にあるときノズルは $\angle\delta$ だけ上方斜面側に偏している。これによると上半斜面散水量の下半斜面のそれに対する比は $(90^\circ - \delta) / (90^\circ + \delta)$ であるから, $\theta = 30^\circ$, $\beta = 28^\circ$ (RB70 の場合, 極端な急傾斜) のとき $(90^\circ - 14^\circ) / (90^\circ + 14^\circ) = 0.73$ と影響が強く出てくる。また水流の方向が等高線上にあるときのノズルの仰角は ϵ だけ高くなっている。

$$r + \epsilon = \sin^{-1} \left(\frac{\sin r}{\cos \beta} \right) \quad (4)$$

これらの関係は Fig. VI-3 に併記したとおりである。

(2) 主ノズルが回転軸上で斜面を上昇しつつ回転する場合と下降しつつ回転する場合との回転速度に差が生ずること。急傾斜地 ($\theta = 30^\circ$) での実測値は $\pm 10\%$ 程度であったから, 単一散布図型の左右では主ノズルについては最大限 $\pm 10\%$ の散水量の差が生ずることになる。しかし副ノズルは上と逆の効果を与えるから, $7.2 \times 4.8 \text{ mm}$ (高圧), $4.8 \times 3.2 \text{ mm}$ (中圧) 級のノズルを使用する場合噴出量は (主ノズル) / (副ノズル) $\div 0.7 / 0.3$ であることにより, 散布図型の左右での分布誤差は最大限 $\pm 4\%$ 程度となる。

ところで, 上述の (1), (2) の結果からすれば急傾斜地では散水量分布が乱れて適正な配分効率を得られないのではないかという不安が持たれるのであるが, スプリンクラーは必ずオーバーラップして配列するので, (2) 項については完全に打消され, (1) 項についても傾斜方向の間隔を縮少することによって適正な配分効率を期待できることがわかった。このことは以下に述べる配分効率と傾斜度との関係からも明らかである。

3 単一散水散布図型

緩傾斜地 (14°) と急傾斜地 (33°)* で、1—2項で得た適正回転軸傾度 β にライザー管を設定し、単一散布図型試験を行なった。

3-1 無風時単一散布図型

急傾斜地における図型は Fig. VI-5 に示すとおりである。ただし下半斜面の図型については、土えん堤斜面を利用して行なった本試験では地形の関係上、上半部分のみしか観測していないので $\theta = 14^\circ$ における実測値を若干修正してつなぎ合わせたものである。図型は等高線方向に長径をもつ楕円形となり上半部分の散水面積が縮小された形となるが、散水域がリング状になる現象は中圧の場合には全くあらわれず、高圧の場合でも緩和されていることがわかる。適当な間隔に組み合わせることによって十分均等な散水分布が得られる可能性を示している。

3-2 風による影響

回転軸を鉛直にした場合、とくに下方斜面に対しては水流が非常に高く飛ぶために風の影響を強く受けることが観察された。しかし、2節で述べたように回転軸を傾けて散水すると飛跡は平地散水の場合と大差なく、したがって風の影響も平地の場合と大きな差異は見られなかった。以上のように水滴の飛行距離が同一ならば風の影響も同一と考えて、以下の考察は平地散水に及ぼす風の影響と同一データを準用して行なった。

4 配列間隔について

4-1 傾斜方向の間隔縮小

前節で得た 33° 傾斜地の散布図型をもとに図上組合わせを行なって適正な配列間隔を見出そうとした。それらの計算結果をまとめると Table VII-1 のようになる。

これらの結果から散水直径に対する間隔率を平地のそれと比較すると、RBNo. 70 の場合傾斜方向 (dip) に 5% 減で、水平方向 (strike) には同一の値となった。

* 第V章, Fig. V-1を参照

SS 60Fの場合もdip 方向5%減と考えられる (SS 60Fの副ノズルのブレーカは昭和39年度に改良されたので, 平地無風時の α_x は52%になっていると仮定)。次に中圧についてみるとRB.30, SS30F 2共にdip 方向に6%減でstrike 方向には不変であった。一方14°傾斜地における散水実験の結果に対しても同様な考察を行なった。それらの結果からdip 方向の間隔縮少率は地表傾斜度と一次関係にあると見なしてFig.W-6のように整理した。

例えば傾斜度20°におけるRB.70Bの適正配列間隔を求めると,

$$R(\alpha_a - m) \times R\alpha_b \text{ として}$$

$$\text{無風時では } \alpha_a = \alpha_b = 54\%$$

$$m = 3\% \text{ (Fig.W-6より)}$$

$$R = 41 \text{ m}$$

であるから

$$[41(0.54 - 0.03)] \times [41 \times 0.54] = 21 \text{ m} \times 22 \text{ m}$$

と決定される。

Table W-1 急傾斜地(33°)における E_p の低下

	E_p (平地)	E_p (急傾斜地)	E_p の低下
中圧RB No. 30	98%	96%	2%
高圧RB No. 70	93	89	4

4-2 風の影響の考え方について

いま単純に考えて図型に与える風の影響を平地散水のとくと同一とし(前述), 風向を傾斜方向(dip)と水平方向(strike)の2方向とする。斜面に対して斜から吹く場合には2方向成分のうち大きい方向を主方向とする。したがって各風速階級に対する適正配列を平地において設定し, 傾斜地においてはdip 方向にmだけ縮少すればよいことになる。すなわち, 風向が水平方向の場合は,

$$R(\alpha_x - m) \times R\alpha_y$$

となるから配列の短辺はますます縮少し, 風向が斜面方向の場合

$$R\alpha_x \times (\alpha_y - m)$$

となるから傾斜と風の影響が相乗されて配列は狭少となってくる。傾斜度 25° の場合の適正配列（風向は等高線に平行）を上式により算出すれば Table VI-2 のとおりとなる。

Table VI-2 風速階級別適正配列間隔および配分効率
(傾斜度 25° の場合)

	風速階級	散水直径 (m)	平地間隔率		傾斜地間隔率		傾斜地 適正配列		配分効率 (E_p %)	
			α_x	α_y	α_{x-m}	α_y	d_x (m)	d_y (m)	平地	傾斜地
中 圧	m/sec ~0.5	31	0.58	0.58	0.53	0.58	16	18	98	96.5
	0.5~1.0	"	0.52	0.58	0.47	0.58	15	18	96	94.5
	1.0~2.0	"	0.45	0.52	0.40	0.52	12	16	94	92.5
	2.0~3.0	"	0.45	0.52	0.40	0.52	12	16	93	91.5
	3.0~4.0	"	0.45	0.45	0.40	0.45	12	12	90	88.5
高 圧	m/sec ~0.5	41	0.54	0.54	0.50	0.54	21	22	93	90
	0.5~1.0	"	0.49	0.54	0.45	0.54	18	22	92	89
	1.0~2.0	"	0.49	0.54	0.45	0.54	18	22	91	88
	2.0~3.0	"	0.44	0.49	0.40	0.49	16	20	90	87
	3.0~4.0	"	0.44	0.49	0.40	0.49	16	20	89	86

4-3 配分効率について

以上のような配列間隔を適正と考えて図上組合わせ計算によって配分効率を算出すると傾斜度 33° においては平地と比較して、中圧の場合 2%，高圧の場合 4% 低下するに過ぎない。低下率が地表傾斜度と一次関係にあると仮定して Fig. VI-7 のようにあらわした。この低下率は無風時の場合であるが、各風速階級に対しても同一値をとることができる。仮定すれば Table VI-2 の右欄のように整理できる。

以上のように、傾斜地における散水試験のデータは十分ではなかったので、急傾斜無風

時の散布図型をもとに考察を進め，すべて平地における間隔， E_p の値を基礎として傾斜補正を加えることによって一応の結果を出した。

5 総 括

(1) 傾斜地において良好な散布図型を得るためにはスプリンクラー回転軸を斜面下方に傾ければよいことを見出し，噴出水流飛跡を考察して地形傾斜度と適正回転軸傾度との関係を Fig. VI-3 に示した。回転軸傾斜によって生ずる影響 (δ, ε) も同図にまとめたが，これらはスプリンクラー組合わせ散水によって相殺される。

(2) 急傾斜地単一散布図型を図上複合して考察を進め，平地における配列間隔， E_p をもとに傾斜補正を施して，任意の傾斜，風速条件下での適正配列， E_p 算出を容易に行なうみちを開いた。傾斜度に応じた間隔減少係数， E_p 減少係数を Figs. VI-6 および 7 に示した。

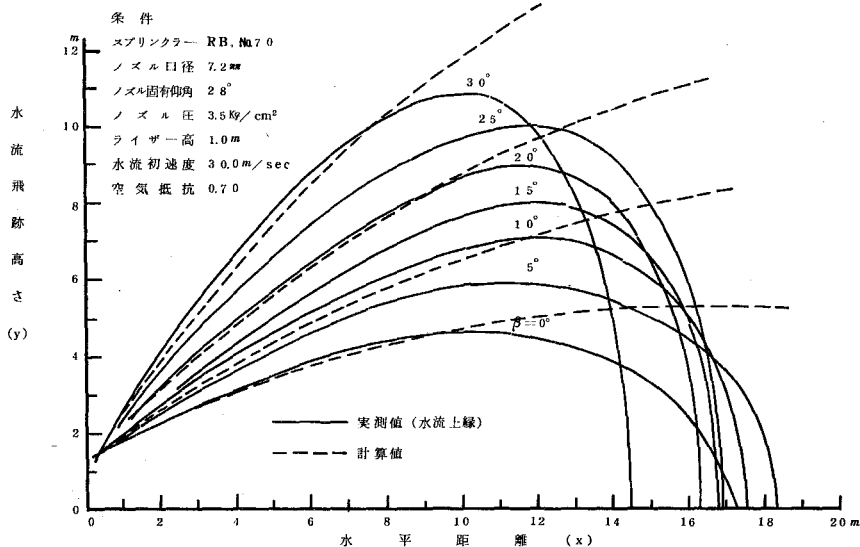


Fig. VI-1 メインノズルからの噴出水流飛跡 ($\beta=0 \sim 30^\circ$, 実測値と計算値)

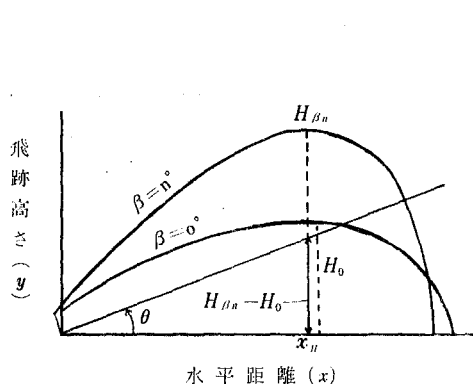


Fig. VI-2 地表傾斜角 (θ) とスプリンクラー回転軸コウ配 (β) との関係

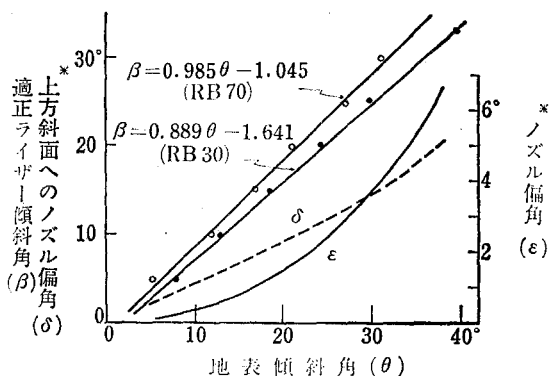


Fig. VI-3 地表傾斜角 (θ) に対する適正ライザー傾斜角 (β) およびノズル偏角 (δ および ϵ)

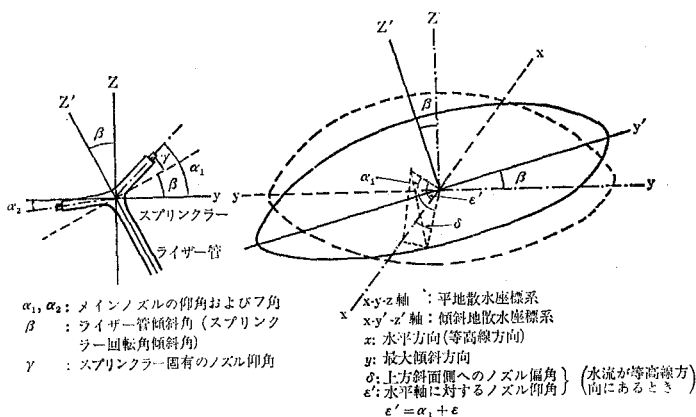


Fig. VI-4 傾斜地におけるスプリンクラー設置

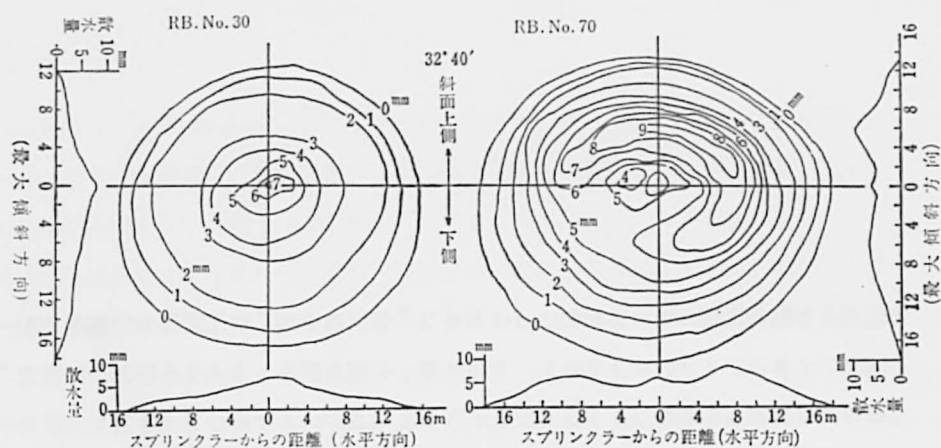


Fig. VI-5 急傾斜地における散布図型 (傾斜角 $32^{\circ}40'$)

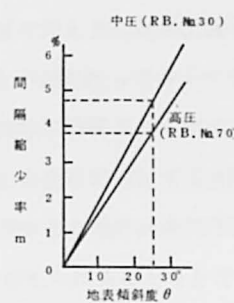


Fig. VI-6 地表傾斜度と間隔減少率 (dip方向, m)

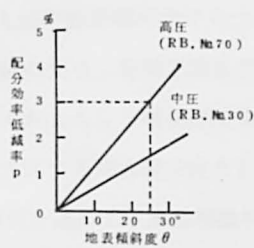


Fig. VI-7 地表傾斜度による配分効率の低減



多数複合散水試験 (かつらぎ)
RB.No. 30 14本立



多数複合散水試験 (遠方)
RB.No. 70 10本立

一連の本研究は研究上の“興味の対象”よりはむしろ畑地カンガイ計画に関する諸因子の“重要度”に視点をおき、必要な因子、項目はすべておさえたつもりではある。反面各因子に対してはどれについてもつっこみ方が不十分であることは筆者自身痛感している。しかし、畑地カンガイ計画に限らずいわゆる技術学の体系化にとって必要なのは、重要度の高いすべての関連因子を網羅して理論的に関連づけ、しかも同一精度で扱うということではなかろうか。ある局限された一部面のみが詳細に高精度に追求されていてもその他の因子がすっぱり抜けていて、現実の現象とのギャップを埋めるに単純な補正係数をもって解決するという態度は、ことに技術学の体系化に関していえば、望ましいことではない。

用水量計画の考え方は畑地土壤水に関する現象の解明 — とくに水分移動特性の解明 — が進歩すると当然変わってゆくべきものである。たとえば乾燥過程における土壤水分移動特性がより詳細に研究されてゆけば、カンガイ対象土層の深さ、有効下限水分値、有効雨量保留域などの決定に対してより確固たる基礎が与えられようし、植物根による吸水の物理現象の研究がより進めば有効下限水分、生産性を最大にする用水量決定などに関して理論的基礎が与えられることなどである。筆者らも本研究を通して、水分移動特性を中心にカンガイ対象土層深さ、下限水分値決定などの用水量問題および散水配分効率などに若干の新しい考え方を提案することができたが、理論研究の発展段階が未だホ場の現象を十分説明づける域に達していないこともあって、筆者の研究方法は実証的とならざるを得なかった。

ともあれ畑地カンガイ計画法に関しては現在その調査方法がようやく統一されつつあるのであって、各地に信頼性のあるデータが蓄積され、総合されて、カンガイ計画法を体系化してゆくのはこれからだといっても過言ではない。その意味から本研究がその調査方法、調査必要因子の重要度、因子間の関連性などについて今後のより進んだ研究のための一指针ともなれば幸いである。

本論文のほとんどすべては筆者ら自身が計画し、実測したデータにもとづいてなりたっている。データの一つ一つがそのときの状況と共に“汗のにおい”を伴ってなつかしく憶

い出される。汗といっても“汗の結晶”の汗であるよりも、4年にわたって盛夏炎天下の果樹園で作業したときの文字通りの“汗のにおい”なのである。散水後のミカン園の炎天のもと気の遠くなるような蒸し暑さの中での土壌水分測定、採土、ヤブ蚊の攻撃にほしいままにされながらの夜間測定、清澄とは言えない小池の水をかぶりながらの散水テスト、遠方や荒見の急傾斜面の毎日ののぼり降り、等々。これらも今となってはなつかしい思いである。

謝

辞

末尾ながら本研究に対し終始ご指導とご協力を賜った多くの人達に深い感謝の意をささげる。恩師富士岡義一教授はこの研究に発端と方向づけを与えて下さったことをはじめとして、一つ一つのデータを検討してきびしいご批判とするご指示を与えて下さった。本文執筆についても終始激励を賜わり、詳細に閲読していただいた。本研究はもともと京都大学、近畿農政局、和歌山県三者協同になる農林省計画基準調査の一環としてはじめられたものであり、とくに近畿農政局計画部技術課（当時）の中川泰男技官は共同研究者として常に筆者と行動を共にし、アイデアを交換し、ディスカッションした仲であった。

和歌山県耕地課の関係者の方々、とくに村上幸保氏、和歌山県果樹園芸試験場紀北分場の上野晴久、石崎政彦（現在和歌山県農業センター）、松山良樹の諸氏からは研究遂行上での便宜とご協力をいただき、当時農業工学教室研修員であった久野 宏、灘 利彦両氏は現地試験とその後のデータ整理などの苦楽を共にして下さった。また試験ホ場を提供して下さい下さった遠方、荒見、かつらぎ、切畑地区の園主の方々に対して厚くお礼申し上げる。

引用文献

第 I 章

- 1) Richards, L.A. : Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, 1, pp.318-333 (1931)
- 2) Gardner, W.R. : Solution of the flow equation for the drying of soils and other porous media. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 23, pp.183-187 (1959)
- 3) 白井清恒：蒸発乾燥による土壌水分の減少について
三重大農・学術報告, 第10号 pp. 49-60 (1955)
- 4) 小林 一：畑地土壌水の動態とその測定法に関する研究 (博士論文)
pp. 169-173 (1960)
- 5) Philip, J.R. : The physical principles of soil water movement during the irrigation cycle. Proc. 3rd. I.C.I.D. Congr., R7, pp.126-154 (1957)
- 6) Gardner, W.R. : Dynamic aspects of water availability to plants. Soil Sci., 89, pp.63-73 (1960)
- 7) Vazquez, R. and Taylor, S.A. : Simulated root distribution and water removal rates from moist soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 22, pp.106-110 (1958)
- 8) 寺沢四郎：畑土壌の土壌水の運動に関する研究 (I) ~ (Ⅶ), 日土肥誌,
32・5, 6, 7, 8 33・10, 12, 12 34・3 (1961~63)
- 9) 椎名乾治・竹中 肇：畑地保留水の消費機構 (I) ~ (Ⅱ), 農土研別冊2号,
pp. 49-55, 同4号, pp. 24-30 (1961)
- 10) 椎名乾治・豊田久承：果樹園土壌の水分減少機構 (Ⅲ), 農土研, 30・3,
pp. 149-154 (1963)
- 11) 椎名乾治：蒸発散による畑地水分の減少機構に関する研究, 農土試報告, 第1号

- pp. 83~156 (1963)
- 12) 竹中 肇：層序からみたカンキツの水分消費，農土研，34・8
pp. 483-484 (1966)
- 13) たとえば近畿，中四国，東海，関東各農政局計画部技術課のそれぞれの「畑地カンガイ計画基準作成調査報告書」
- 14) 富士岡義一・西出 勤：畑地用水量決定の合理化に関する研究（Ⅰ）～（Ⅱ），
農土研別冊5号，pp. 10-16，農土論集12号，pp. 20-24
(1963, 65)
- 15) 玉井虎太郎：畑地用水法の合理化に関する研究，愛媛大農・紀要，2・2
pp. 1~333 (1956)
- 16) 松下 進：日本地方地質誌（近畿地方），pp. 165-178，朝倉書店
(1953)
- 17) 富士岡義一・西出 勤：土壌水分測定用ガラスフィルタブロックとその自記記録計
について，農土研別冊，9号，pp. 5-10 (1964)
- 18) 西出 勤：畑地用水量決定の合理化に関する研究（博士論文）pp. 11-56
(1967)
- 19) 鈴木重義・福田仁志：蒸発散位の計器蒸発量による一算出法，農業気象，
13・3，pp. 81-85 (1958)
- 20) 椎名乾治：畑地カンガイ時期判定指標としての蒸発計，農土研，27・7，
pp. 468-471 (1960)
- 21) 椎名乾治：畑地カンガイ調査計画法（その1），（その6），農土研，33・1，
pp. 24-29，同33・7，pp. 16-21 (1965)
- 22) 富士岡・海田・中川：ミカン園散水カンガイの研究（Ⅰ），（Ⅱ），農土論集
27号，pp. 1-14 (1969)

（参考文献）

山 崎 不二夫他：「畑地かんがい」農文協（1959）

A・A. ローゼ：「土壌と水」東大出版会（1963）
山崎不二夫 監訳

A. I. フダゴフスキー：「耕地の蒸発散」農林水産技術会議調査資料（1965）
農 林 省 内 訳

戸 薊 義 次他：「作物生理講座，3，—水分生理—」朝倉書店（1958）

Russel, E.J. : Soil Condition and Plant Growth. London
(1950)

Shaw, B.T. : Soil Physical Conditions and Plant Growth.
New York (1952)

Penman, H.L. : Vegetation and Hydrology. Bucks (1963)

Gates, D.M. : Energy Exchange in the Biosphere. Tokyo
(1965)

Kozlowski, T.T. : Water Metabolism in Plants. Tokyo (1965)

第 II 章

- 1) 椎名乾治：畑地カンガイ調査計画法（その1），農土研，33・1，
pp. 24-29 （1965）
- 2) 椎名乾治：畑地の水利用合理化と今後のカンガイ計画，畑地カンガイの研究，
2号，pp. 3-8 （1966）
- 3) 富士岡義一：畑地用水計画上の問題点について，畑地カンガイの研究，3号
pp. 4-5 （1967）
- 4) 小林・井上：果樹のカン水理論の検討
- 5) 戸薊義次ら：「作物生理講座．3 — 水分生理編」pp. 48-50，朝倉書店
（1958）
- 6) 上野・石崎・松山：柿の水分管理に関する研究，和歌山県果樹園芸試験報告，第1号
pp. 1-16 （1967）
- 7) 京都大学・近畿農政局・和歌山県：計画基準畑地カンガイ調査「粉河・切畑」地区
報告書（昭和39,40,41年度），近畿農政局（1964, 65, 66）
- 8) 富士岡・海田・中川：ミカン園散水カンガイの研究（Ⅱ），農土論集27号，
pp. 9-14 （1969）
- 9) Shaw, R.H. and Laing, D.R. : Plant Environment and
Efficient Water Use . Chap.5, Moisture stress and
plant response. (1966)

第 II 章

- 1) 山崎不二夫ら：『畑地カンガイ』 pp. 158-163, 農文協 (1959)
- 2) Bodman, G.B. and Colman, E.A. : Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 8, pp.116-122 (1943)
- 3) Philip, J.R. : The physical principles of soil water movement during the irrigation cycle. Proc. 3rd. I.C.I.D. Congr., R.7. pp.126-154 (1957)
- 4) Philip, J.R. : The theory of infiltration (I)-(V). Soil Sci., 83-84 (1957)
- 5) Young, E.G. : Moisture profiles during vertical infiltration. Soil Sci., 84, pp.283-290 (1957)
- 6,7) Rubin, J. and Steinhardt, R. : Soil water relations during rain infiltration (I),(II). Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27, pp.246-251, 28, pp.1-5 (1963,64)
- 8) Ferguson, H. and Gardner, W.H. : Diffusion theory applied to water flow data obtained using gamma ray absorption. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27, pp.243-246 (1963)
Gurr, C.G. : Use of gamma rays in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soils. Soil Sci., 94, pp.224-229 (1962)
- 9) Young, E.G. : Redistribution of moisture in porous materials after infiltration (I),(II). Soil Sci., 86, pp.117-125, 202-207 (1958)
- 10) Philip, J.R. and de Vries, D.A. : Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Trans. Amer. Geophys. Union, 38, pp.222-232 (1957)
- 11) de Vries, D.A. : Simultaneous transfer of heat and

- moisture in porous media. Trans. Amer. Geophys. Union, 39, pp.909-915 (1958)
- 12) Philip, J.R. : Numerical solution of equation of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent. Trans. Faraday Soc., 51, pp.885-892 (1955)
- 13) 富士岡義一・西出 勤：土壤水分測定用ガラスフィルターブロックとその自記記録計について，農土研別冊，9号，pp. 5-10 (1964)
- 14) 和歌山県農林部耕地課：紀の川下流地区土地改良調査，畑地カンガイ特殊調査結果報告書（昭和36年），和歌山県 (1962)
- 15) 京都大学・近畿農政局・和歌山県：計画基準畑地カンガイ調査「粉河・切畑」地区報告書（昭和38，39，40年度），近畿農政局 (1963，64，65)
- 16) 富士岡・海田・中川：ミカン園散水カンガイの研究，農土論集，27号，
- 17) 海田能宏：柑橘園における散水カンガイの研究（修士論文），pp.28-46 (1964)

第 IV 章

- 1) 椎名乾治：表層カンガイの設計とその応用例，農土研，32・6，pp. 309-315 (1964)
- 2) 矢部勝彦（未発表）
- 3) 総山信雄：畑地カンガイにおける有効雨量の一般的法則性と事業計画への適用について，農土研，32・2，p. 102 (1964)

第 V 章 および 第 VI 章

- 1) Levine, G. et al : Unpublished data. New York State Agric. Exp. Station, Cornell Univ., written in Sprinkler Irrigation (3) (1959)
- 2) 井上 博：On size distribution and evaporation losses from spray droplets, emitted by a sprinkler. 香川大農学術報告，13(2)，pp. 202-212 (1962)

- 井上 博：On drop size distribution in spray emitted by
a sprinkler under different conditions.
香川大農学術報告，14(2)，pp.161-171(1963)
- 3) Mugele, R.A. and Evans, H.D. : Ind. Eng. Chem., 43 (1951)
 - 4) 桑野定美ら：斜面散水の均一化(その基礎的研究) I, II. 畑地農業, №81,
pp. 170-172, №82, pp. 216-218 (1965)
 - 5) 岡村俊一：スプリンクラー散水に関する基礎的研究 (未発表博士論文) (1968)
 - 6) 岡村俊一：スプリンクラー散水の理論的考察(I), (II), (III), 農土論集,
26号, pp. 49-67 (1968)
 - 7) 白井清恒：散水カンガイにおける損失水量, 三重大農学術報告, 20,
pp. 61-83 (1959)
 - 8) Frost, K.R. and Schwalen, H.C. : Sprinkler evaporation
losses. Agric. Eng., 36-8 (1955)
 - 9) 太田頼敏：スプリンクラー散水における風の影響に関する実験的研究(博士論文)
(1961)
 - 10) Christiansen, J.E. : Irrigation by Sprinkling, Bul.
670. Univ. of California (1942)
 - 11) Israelsen, O.W. and Hansen, V.E. : Irrigation
Principles and Practices. New York (1962, 3rd.
ed.)
 - 12) Woodward, G.O. : Sprinkler Irrigation. pp.162-182,
Washington D.C. (1959, 2nd. ed.)
 - 13) 京都大学・近畿農政局・和歌山県：計画基準畑地カンガイ調査「粉河・切畑」地区
報告書(昭和39, 40年度) 近畿農政局 (1965, 66)
 - 14) 富士岡・海田・中川：ミカン園散水カンガイの研究(IV), (V), 農土論集,
27号, pp. 21-32 (1969)
 - 15) 水之江・長谷部・河野：カンガイ方法確立に関する研究(I), 東海近畿農試報,
11号, pp. 71-90 (1964)
 - 16) 京都大学・近畿農政局・和歌山県：畑地帯改良基礎調査「粉河切畑地区」カンガイ
調査報告書(昭和37年度) 近畿農政局 (1963)

17) 永井莊七郎：「水理学」 pp. 118-122, コロナ社 (1957)

(参 考 文 献)

鈴木 博 彦：「散水灌溉の研究」(博士論文) pp. 327-345 (1961)

同 上：「撒水灌溉法」 土地改良新聞社

大畑昇一・猿渡良一：「畑地カンガイハンドブック」 畑地農業振興会 (1967)

山崎 不二夫ら：「畑地かんがい」 pp. 123-172 (1959)

高 橋 喜 彦：「降水の物理学」地人書館 pp. 37-57 (1959)

海 田 能 宏：柑橘園における散水カンガイの研究 (修士論文) (1964)